

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

- UNICAMP -

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRÍCOLA

PARECER

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Sonia Cristina Romani e aprovada pela Comissão Julgadora em 15.03.85, Campinas, 15 de março de 1985.

J. J. J. J.
Presidente da Banca

ESTUDO DE UM SISTEMA TOTAL,
COLETOR SOLAR - SECADOR DE GRÃOS,
UTILIZANDO TÉCNICAS DE
SIMULAÇÃO MATEMÁTICA

Sonia Cristina Romani

Orientador: Prof.Dr. Sachio Aikawa

02/85

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

1985

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Aos meus pais,
Oswaldo e Elza.
Ao Walter.

AGRADECIMENTOS:

Ao Dr. Sachio Aikawa, pela segura e dedicada orientação.

Ao amigo e colaborador Sandoval Farias da Mata.

Ao amigo Issao Kumagai, pela colaboração nos programas de computação.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola pela colaboração.

A Maria Júlia Dini Fray, pelo serviço de datilografia.

Aos amigos e colegas, pelo estímulo.

A Associação Brasileira das Indústrias da Alimentação, ABIA, pelas cópias e encadernações.

SUMÁRIO

Este trabalho visa a avaliação da secagem de produtos agrícolas através de um sistema composto de coletor solar e silo secador.

Para tanto, foi estudada a simulação matemática do sistema total, com a execução de alguns casos de secagem, para um único tipo de coletor solar.

Este coletor é composto de uma camada isolante coberta com uma chapa ondulada que absorve diretamente a radiação solar. A temperatura do ar na saída do coletor solar é a mesma na entrada do secador.

O produto de secagem utilizado foi o milho e houve variações de parâmetros do coletor e do secador. Como modelos climatológicos foram utilizados três dias diferentes, com os respectivos valores de temperatura ambiente, radiação solar e umidade relativa.

Através da simulação do sistema total pode-se fazer considerações com respeito à construção e funcionamento do sistema coletor-secador.

SUMMARY

This work has in view evaluate drying of agricultural products through a system compound of solar collector and silo-dryer.

For this, it was studied the mathematical simulation of the whole system, with the execution of some cases of drying for one type of solar collector.

This collector is compund of isolation and a curled plate which absorbs solar radiation. The air temperature in the outlet of solar collector is the same as in the inlet of dryer.

The agricultural product used was the maize and were made variances of parameters of the collector and dryer. As climatics models were used three idifferentes days with the respectives values of ambient air temperature, solar radiation and humidity relative.

Through mathematical simulation of the whole system it can make considerations about the construction and operation of the system collector-dryer.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. SISTEMA DE SECADOR COM COLETOR SOLAR	2
2.1. Revisão Bibliográfica	2
2.2. Fluxograma	6
2.3. Modelos climatológicos	7
3. ESTUDO DO COLETOR SOLAR EM REGIME PERMANENTE	11
3.1. Balanço de energia em regime permanente	11
3.2. Legenda dos símbolos usados no balanço de energia ..	12
3.3. Energia útil do coletor solar	14
3.4. Temperaturas médias dos componentes	14
3.5. Radiação solar sobre a superfície do coletor	16
3.6. Razão de mistura e vazão do ar	17
3.7. Rendimentos do coletor solar	18
4. ESTUDO DO COLETOR EM REGIME TRANSITÓRIO ,.....	20
4.1. Balanço de energia em regime transitório	20
4.2. Temperaturas médias dos componentes	22
4.3. Rendimentos do coletor solar em regime transitório .	28
4.4. Energia armazenada	29
5. SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DE SECAGEM A BAIXAS TEMPERATURAS PELO MODELO DE MOREY	31
5.1. Balanço de energia entre o ar e o produto	31
5.2. Balanço de massa entre o ar e o produto	32

.../.

5.3. Umidade relativa do ar	34
5.4. Umidade relativa de equilíbrio para o produto	35
5.5. Equação de camada delgada	36
5.6. Deterioração do milho	38
5.7. Paralisação do ventilador	48
6. EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO SISTEMA TOTAL	41
6.1. Resultados da simulação matemática do coletor <u>so</u> lar	43
6.2. Resultados da simulação matemática de secagem	65
6.3. Estudo comparativo da secagem com ar natural e aque <u>ce</u> dores artificiais	82
7. CONCLUSÃO	93
8. SIMBOLOGIA	95
9. ANEXOS	99
10. BIBLIOGRAFIA	124

1. INTRODUÇÃO

Secagem vem a ser um processo que visa a preservação da qualidade dos produtos agrícolas após a colheita. Deve-se secar o produto a uma umidade que evite que este se deteriore até um nível capaz de influir em sua qualidade.

Devido à crise energética e alta dos preços dos combustífiveis, tem-se buscado recursos energéticos alternativos que visem a diminuição dos custos de secagem.

A secagem dos produtos agrícolas com energia solar apresenta-se como uma alternativa eficiente e econômica, sendo a radiação solar uma fonte inesgotável de energia.

Para o dimensionamento de sistemas de secagem com energia solar é necessário um estudo sobre a operação dos mesmos.

A simulação matemática do sistema total de secagem com energia solar mostra-se como uma forma prática e eficiente para a realização destes estudos.

Para tanto, fez-se um estudo do coletor solar em regime permanente e transitório, onde a temperatura do ar de saída do coletotor solar é a mesma na entrada do secador. Para a simulação de secagem utilizou-se o modelo de Morey a baixas temperaturas.

Os resultados obtidos a partir desta simulação matemática fornecerão informações que serão de grande utilidade para os consultores, quando da construção e operação de sistemas de secagem com energia solar, adaptados às diversas condições do país.

2. SISTEMA DE SECADOR COM COLETOR SOLAR:

2.1. Revisão Bibliográfica

O sistema de secagem com coletor solar consiste de dois componentes principais que são o coletor solar e o secador (Figura 1).

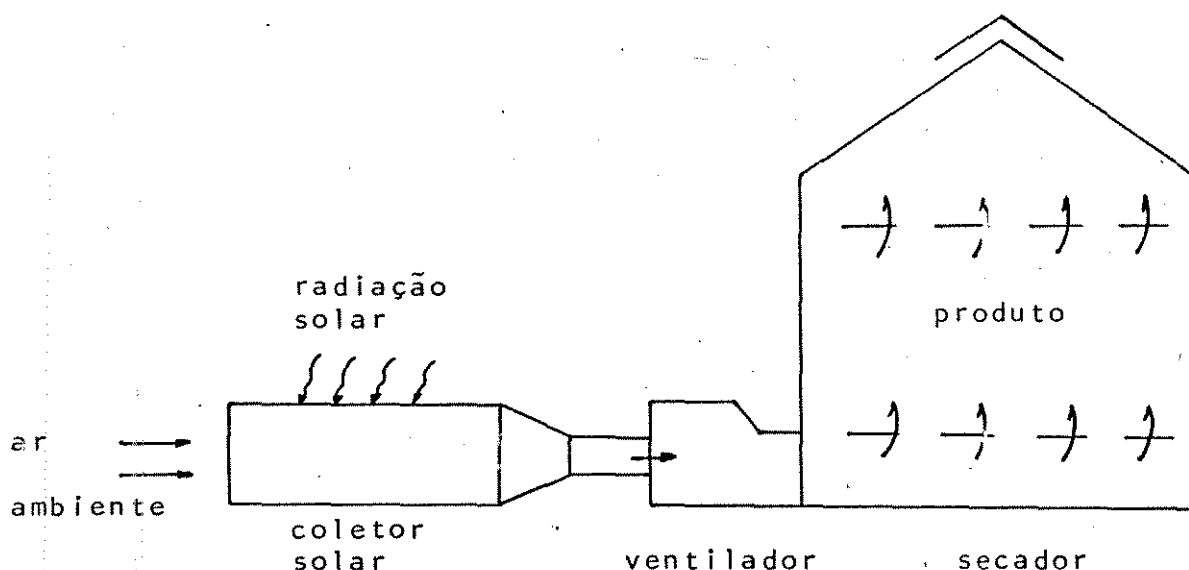


Figura 1. Esquema de sistema de secagem com coletor solar e secador

O ar que passa pelo coletor sofre aquecimento devido ao calor transferido pela superfície absorvente, que recebe diretamente a radiação solar.

Após sua passagem pelo coletor, o ar de secagem passa por um ventilador direcionado à parte inferior do secador, onde, através de uma chapa perfurada ocorre sua distribuição por todo o silo.

Calderwood [7] mostrou a secagem de 7 toneladas de arroz em silo com coletor solar (largura 1,2 m, comprimento 14,6 m e altura 0,15 m), com cobertura transparente. Este sistema reduziu em 25%

o consumo de energia do ventilador, comparado com a secagem com ar natural.

Dorfman [8] secou café num secador denominado "barcaça" acoplado a um coletor solar cuja superfície absorvedora era coberta por uma lâmina transparente.

Conseguiu-se reduzir a área e o tempo de secagem em relação aos terreiros, atingindo-se também melhor qualidade final do produto. A secagem de camadas estacionárias de café com espessura de 0,50 m mostrou-se viável desde que se utilize vazões da ordem de $60 \text{ m}^2/\text{min}/\text{t}$.

Gayaniilo et alii [10] utilizaram o coletor solar de superfície absorvedora descoberta para a secagem de milho. Foi demonstrado que altas vazões resultaram em alta eficiência do coletor solar, independente da simplicidade do sistema utilizado.

Como a maioria dos trabalhos realizados são independentes, ou seja, não guardam relações diretas entre si, não servem portanto para os casos em que os consultores querem aplicar às suas próprias condições. Devido a este fato, necessita-se de um estudo para todos os casos gerais, através de simulação matemática do sistema total.

Tipo de coletor solar:

Como primeira opção, neste trabalho, foi escolhido o coletor solar mais simples (Figura 2) [10].

A placa absorvente é diretamente exposta ao ambiente e

nela incide diretamente a radiação solar. O ar passa entre a placa absorvente e o isolante (pedras ou lã de vidro).

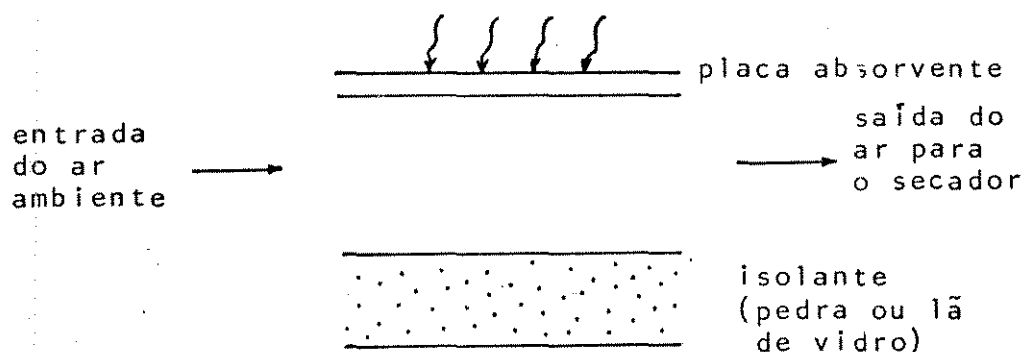


Figura 2. Esquema de coletor solar constituído de placa absorvente e isolante

Para a simulação matemática do coletor solar fez-se os balanços térmicos em regime permanente e transitório [4,11,21,9].

Durante o tempo inicial (pela manhã), e no tempo final ou durante o surgimento de nuvens, tem-se que considerar os componentes dos coletores solares (ex: placas absorventes e isolantes) como estando em regime transitório.

Este efeito ocorre mais frequentemente quando se utiliza pedras como isolante armazenador do que no caso de lã de vidro.

É importante lembrar que nas soluções dos problemas de transmissão de calor não é apenas necessário conhecer o modo de transmissão, mas também determinar quando o processo é permanente ou transitório [14],[22].

O estudo do sistema total é necessário para se obter as respostas a qualquer tipo, dimensionamento ou materiais dos componentes, como também para todos os outros parâmetros possíveis do coletor e secador.

Modelos matemáticos de secagem:

A simulação matemática substitui com vantagem as experiências práticas de secagem, possibilitando testar diversas condições em curto espaço de tempo.

Existem vários modelos conhecidos para se realizar esta simulação, tais como: modelo de Hukill, modelo da Universidade de Michigan (MSU), modelo de Thompson e modelo de Morey.

No modelo de Hukill, a equação prevê o teor de umidade do produto em função da altura da camada e do tempo de secagem [19]:

$$RU = \frac{2^D}{2^D + 2^Y - 1}$$

em que;

$$RU = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e}$$

RU = razão de umidade do produto

U_0 = teor de umidade inicial (% bs)

U_e = teor de umidade de equilíbrio para as condições do ar de secagem (% bs)

D = adimensional de profundidade

Y = adimensional de tempo

O modelo MSU envolve um sistema de quatro equações diferenciais parciais, obtidas dos balanços de calor e massa para o ar e o produto.

Para a resolução deste modelo há a necessidade de um grande número de parâmetros o que implica na utilização de computadores de grande capacidade [5].

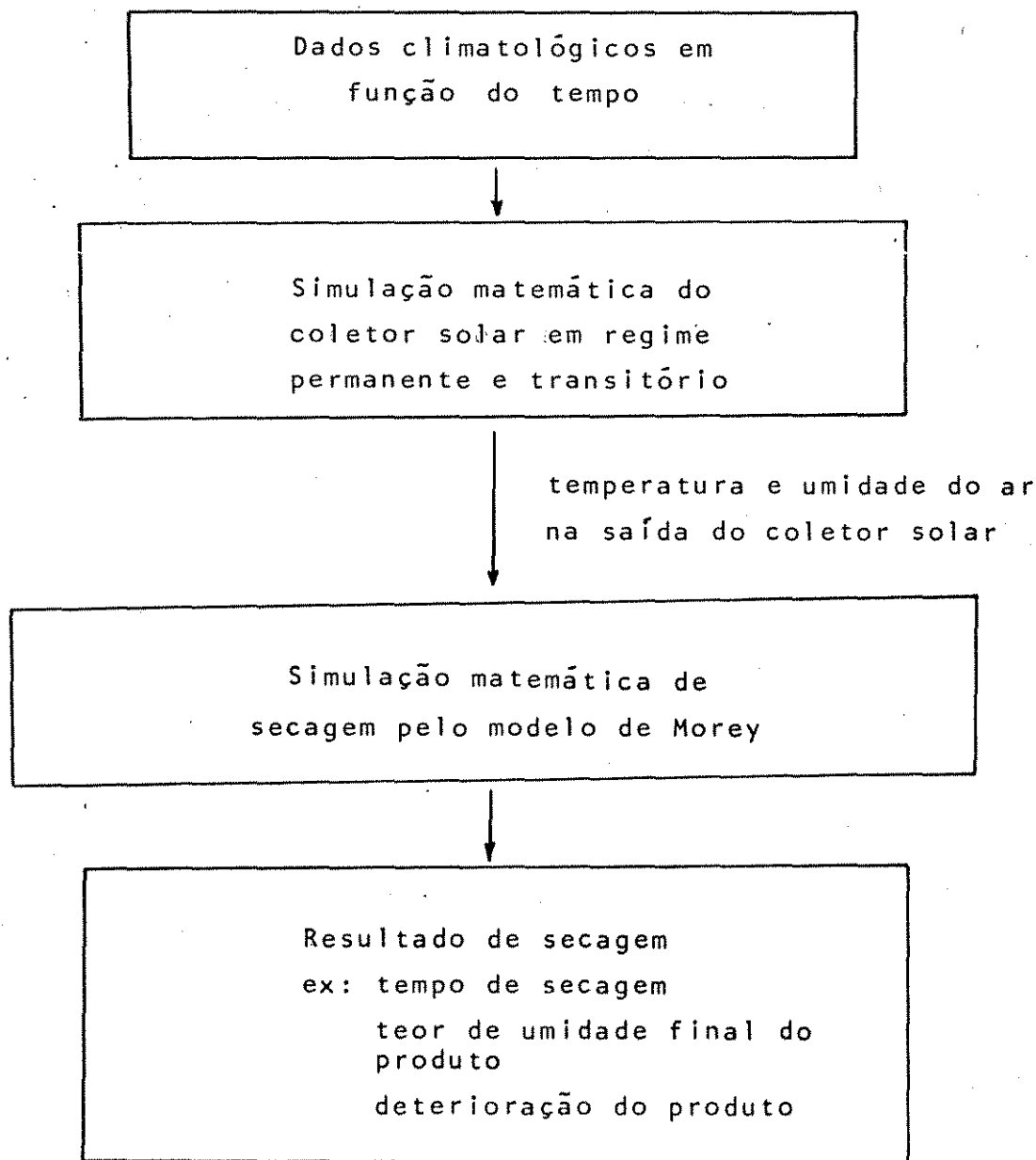
O modelo de Thompson é bastante simples, com curto tempo de computação quando da simulação de secagem a baixas temperaturas, apresenta limitação na precisão do processo de reumedecimento do produto [19,24].

Morey et alii [16,23] incorporou ao modelo de Thompson uma equação de reumedecimento para milho, tornando o modelo mais preciso para secagens a baixas temperaturas.

Secagem com coletor solar é geralmente considerada como uma secagem a baixa temperatura, sendo portanto o método de Morey compatível neste caso e escolhido para o estudo do sistema total.

2.2. Fluxograma:

O fluxograma da simulação do sistema total está mostrado abaixo:



Para este objetivo resolve-se simultaneamente dois sistemas matemáticos (coletor e secador).

Este acoplamento é possível porque a temperatura de saída do coletor solar pode ser considerada igual a temperatura de entrada no secador.

Assim, pode-se obter resultados de secagem a partir de dados climatológicos de diferentes modelos e analisar as viabilidades do coletor solar para a secagem de produtos agrícolas. E também a partir dos resultados de secagem pode-se fazer o dimensionamento a dequado do coletor solar e secador.

2.3. Modelos climatológicos

A temperatura e umidade do ar, na secagem com coletor solar, sendo dependentes das condições ambientais (radiação solar, temperatura ambiente e umidade relativa), sofrem variações em função do tempo.

As condições ambientais variam não apenas diariamente, mas a cada hora. Especialmente a radiação solar, que varia em instantes, dependendo do surgimento de nuvens.

Assim, sendo as variações instantâneas dessas condições importantes na simulação matemática do sistema total, utiliza-se as condições ambientais obtidas em registros meteorológicos, com pequenos intervalos de tempo.

Para este fim, foram escolhidos alguns modelos de dados climatológicos reais, diários, de radiação solar, temperatura ambiente e umidade relativa em função do tempo (Instituto Agrônomo de

(Campinas).

As Figuras 3, 4 e 5 mostram a radiação solar em superfície horizontal, dos dias 11/4, 28/4 e 08/5 do ano de 1979 , respectivamente. As Figuras 6 e 7 mostram as temperaturas ambientes e umidades relativas para três modelos que correspondem aos mesmos dias da radiação solar.

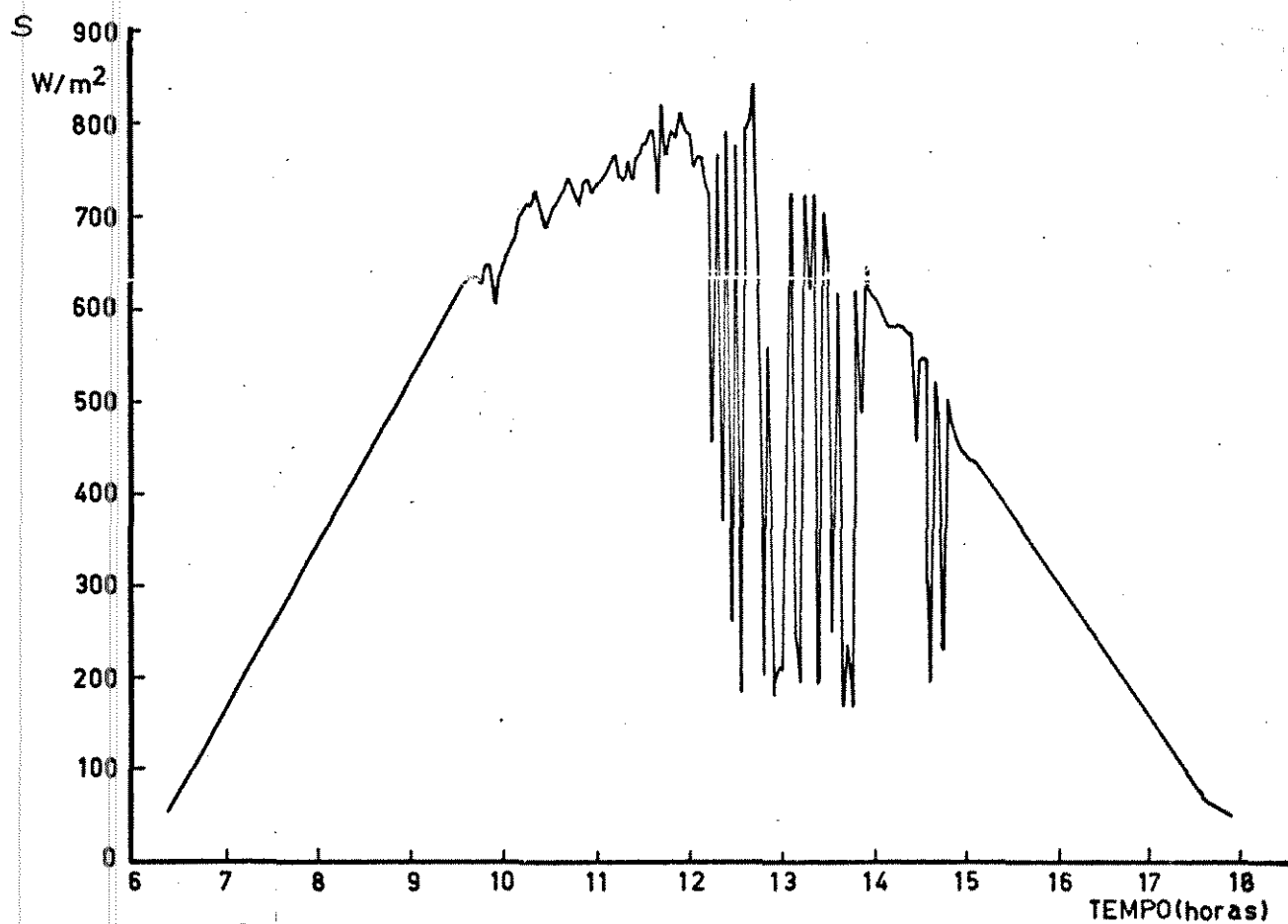


FIGURA 3 Radiação solar do dia 11/04/79 (Modelo I) em função do tempo.

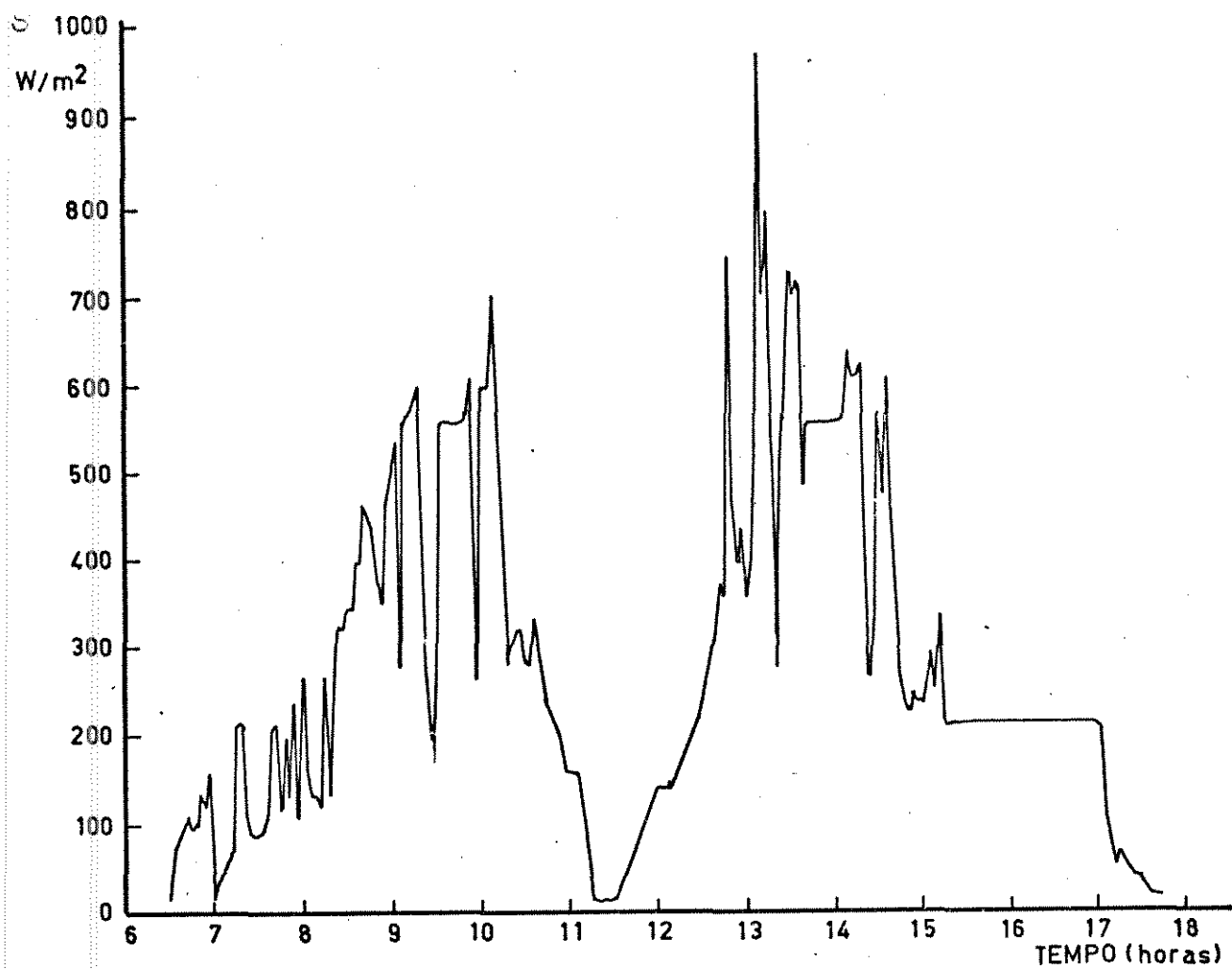


FIGURA 4 Radiação solar do dia 28/04/79 (Modelo II) em função do tempo.

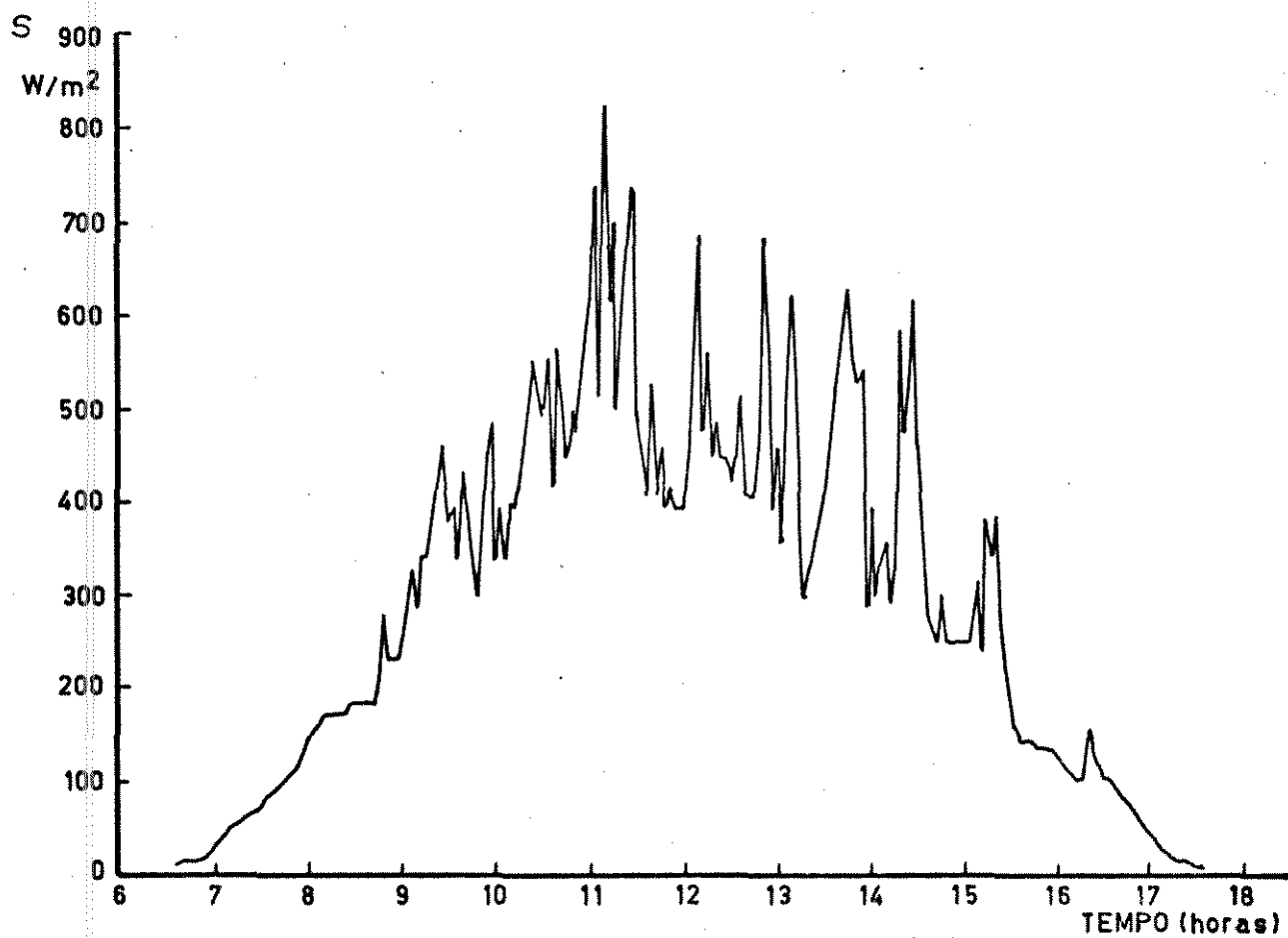


FIGURA 5 Radiação solar do dia 08/05/79 (Modelo III) em função do tempo.

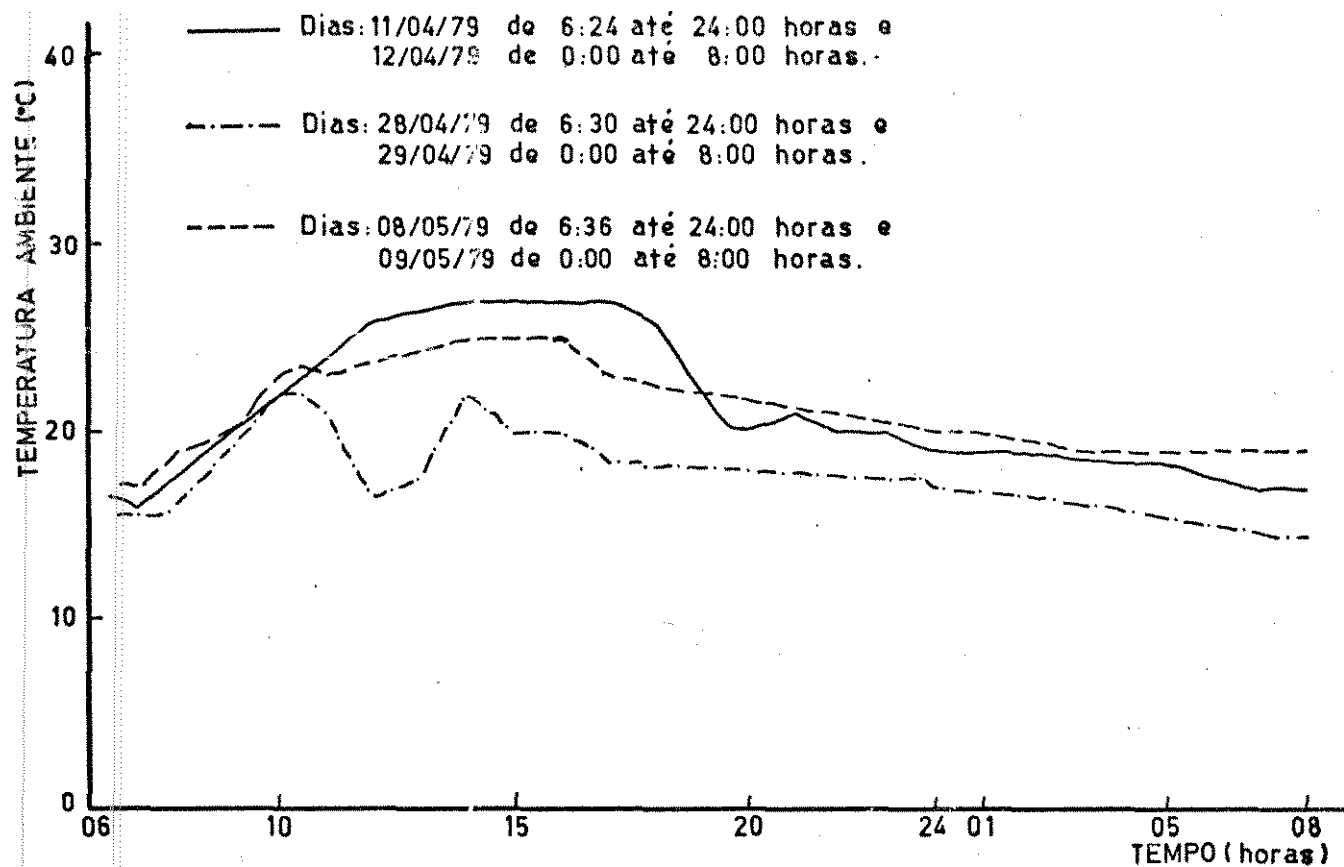


FIGURA 6 Temperaturas ambientes dos modelos I, II e III em função do tempo.

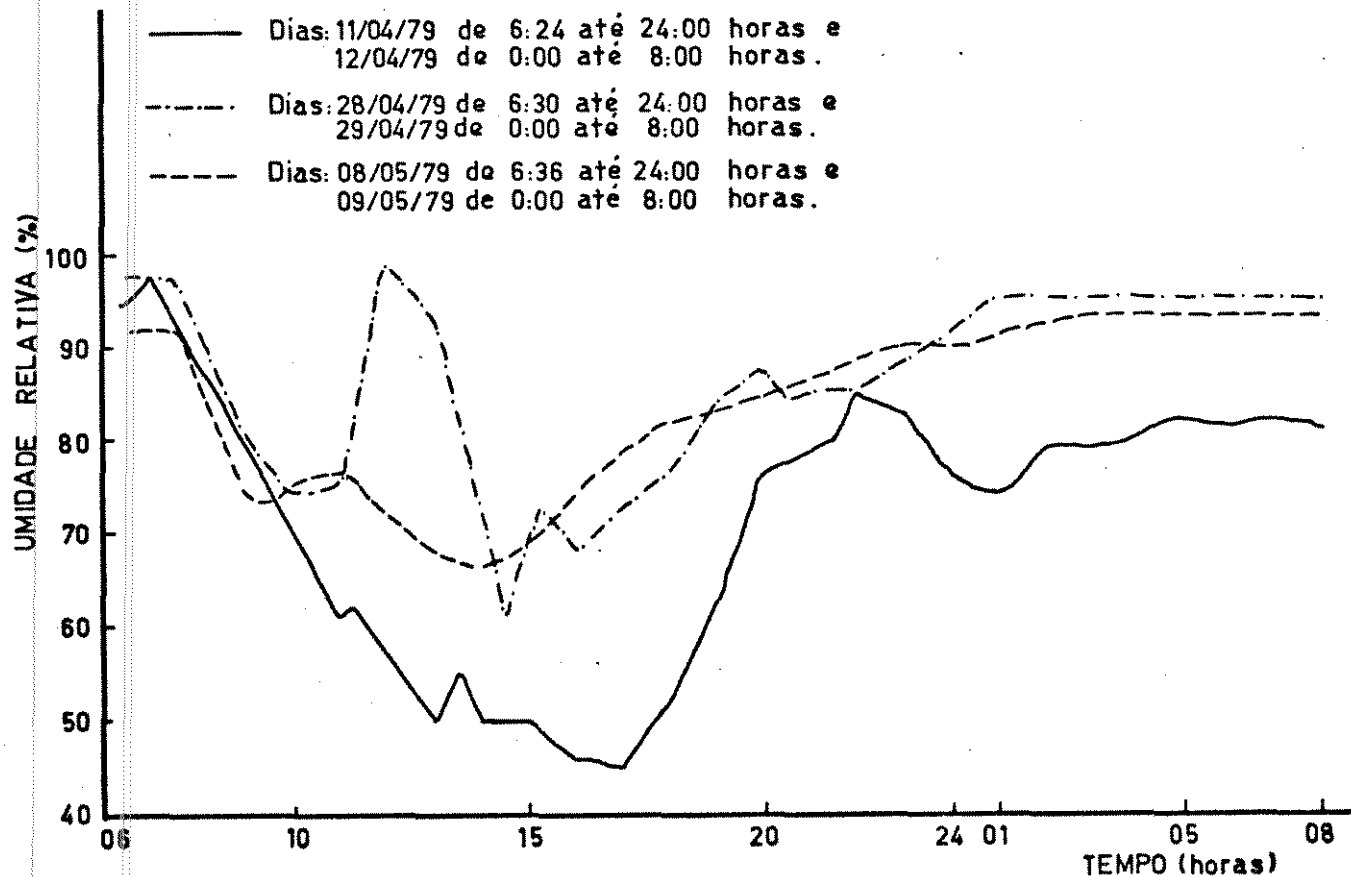


FIGURA 7 Umidades relativas dos modelos I, II e III em função do tempo.

3 . ESTUDO DO COLETOR SOLAR EM REGIME PERMANENTE:

Quando o fluxo de calor em um sistema não depende do tempo, isto é, quando constante, a temperatura em cada ponto não muda e as condições de regime permanente prevalecem. Sob estas condições, o influxo de calor em qualquer ponto deve ser exatamente igual ao efluxo de calor, e nenhuma mudança na energia interna tem lugar [4, 9.11.14].

3.1. Balanco de energia em regime permanente:

O balanço de energia para o regime permanente foi feito considerando-se as trocas de calor existente entre a superfície absorvente e o ambiente, entre a superfície absorvente e o fluido, entre o fluido e o isolante, entre o isolante e o ambiente e entre a superfície absorvente e o isolante (Figura 8).

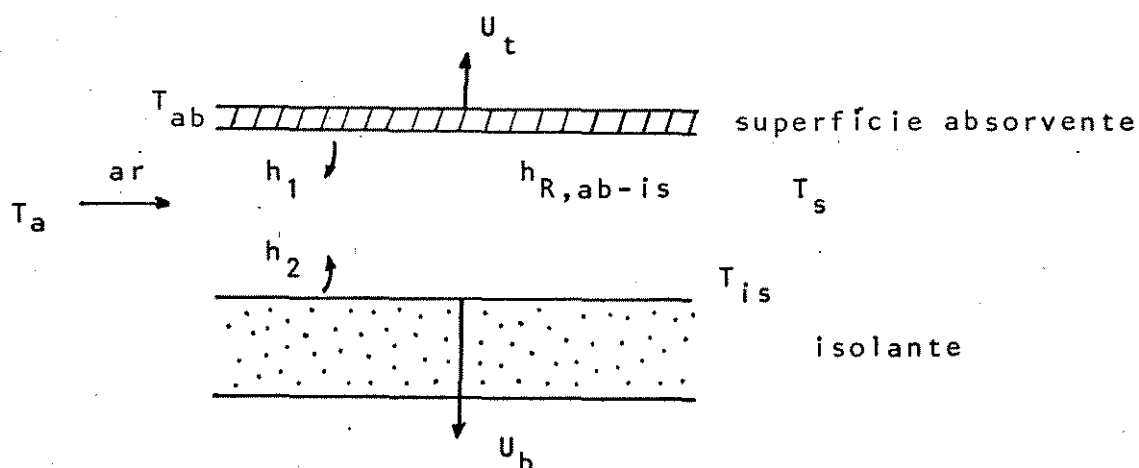


Figura 8. Balanço de energia em regime permanente para o coletor composto de isolamento e superfície absorvente

As equações dos balanços de energia para o ar, superfície absorvente e isolante são as seguintes:

Para o ar:

$$h_1(T_{ab} - T_{fm}) + h_2(T_{is} - T_{fm}) = q_u \quad (1)$$

Para a superfície absorvente:

$$-U_t(T_{ab} - T_a) - h_1(T_{ab} - T_{fm}) + S - h_{r,ab-is}(T_{ab} - T_{is}) = 0 \quad (2)$$

Para o isolante:

$$h_2(T_{fm} - T_{is}) - U_b(T_{is} - T_a) + h_{r,ab-is}(T_{ab} - T_{is}) = 0 \quad (3)$$

sendo que:

$$h_1 = 0,0158 \left(\frac{2\dot{m}}{wu} \right)^{0,8} \left(\frac{\lambda_a}{2h} \right) \quad [12,9]$$

$$h_2 = h_1$$

$$U_t = h_w + h_{r,ab-a}$$

$$h_w = 5.7 + 3.8v \quad [15,9]$$

$$h_{r,ab-a} = \epsilon_{ab,\sigma_s}(T_{ab}^2 + T_a^2)(T_{ab} + T_a)$$

$$h_{r,ab-is} = \frac{\sigma(T_{ab}^2 + T_{is}^2)(T_{ab} + T_{is})}{1/\epsilon_{ab,i} + 1/\epsilon_{is} - 1}$$

$$U_b = \frac{\lambda_{is}}{l_{is}}$$

3.2. Legenda dos símbolos usados no balanço de energia:

q_u = energia útil do fluído por unidade de área do coletor solar (w/m^2)

T_{ab} = temperatura da superfície absorvente ($^{\circ}C$)

- T_{fm} = temperatura média do fluido ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{is} = temperatura da superfície superior do isolante ($^{\circ}\text{C}$)
 T_a = temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
 h_1 = coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície absorvente e o fluido ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)
 h_2 = coeficiente de transferência de calor por convecção entre o fluido e o isolante ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)
 h_w = coeficiente de transferência de calor por convecção entre o vento e a superfície superior da chapa absorvente ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)
 $h_{r,ab-a}$ = coeficiente de transferência de calor por radiação entre a superfície superior da chapa absorvente e o ambiente ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)
 $h_{r,ab-is}$ = coeficiente de transferência de calor por radiação entre a superfície absorvente e o isolante ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)
 U_t = coeficiente de transferência de calor por convecção e radiação, da parte superior do coletor para o ambiente ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)
 U_b = coeficiente de transferência de calor por condução na parte inferior do coletor (isolante) ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)
 $\epsilon_{ab,s}$ = emissividade da superfície superior da chapa absorvente
 $\epsilon_{ab,i}$ = emissividade da superfície inferior da chapa absorvente
 ϵ_{is} = emissividade da superfície superior do isolante
 σ = constante de Boltzman
 v = velocidade do vento (m/s)

S = radiação solar absorvida (w/m^2)

\dot{m} = vazão mássica do fluido (kg/min)

λ_{is} = condutividade térmica do isolante ($\text{w/m } ^\circ\text{C}$)

λ_a = condutividade térmica do ar ($\text{w/m } ^\circ\text{C}$)

ℓ_{is} = espessura do isolante (cm)

u = viscosidade dinâmica do ar (kg/min.m)

w = largura do coletor (m)

h = altura do coletor (m)

3.3. Energia útil do coletor solar:

A partir do balanço de energia acima, obtêm-se a equação da energia útil do coletor solar (Anexo 1):

$$Q_u = A_c F' [S - U_L (T_{fm} - T_a)] \quad (4)$$

em que:

$$F' = (ah_1 + h_2 h_{r,ab-is}) / (ab - h_{r,ab-is}^2)$$

$$U_L = [h_1 (U_b \cdot h_{r,ab-is} + U_t \cdot a) + h_2 (b \cdot U_b + U_t \cdot h_{r,ab-is})] / (a h_1 + h_2 \cdot h_{r,ab-is})$$

$$a = h_2 + U_b + h_{r,ab-is}$$

$$b = U_t + h_1 + h_{r,ab-is}$$

sendo:

F' = fator de eficiência do coletor solar

U_L = coeficiente de perda do coletor solar

A_c = área do coletor solar (m^2)

3.4. Temperaturas médias dos componentes:

As temperaturas médias do isolante e placa absorvente são obtidas a partir das equações (3) e (1), respectivamente:

$$T_{is} = \frac{h_1 \cdot T_{fm} + U_b \cdot T_a + h_{r,ab-is} \cdot T_{ab}}{a} \quad (5)$$

$$T_{ab} = \frac{Q_u}{h_1 \cdot A_c} + 2 T_{fm} - T_{is} \quad (6)$$

a temperatura média do ar vem a ser: [9]

$$T_{fm} = T_a + \frac{Q_u (1 - F_r / F')}{A_c U_L F_r} \quad (7)$$

em que:

$$F_r = \frac{\dot{m} C_a}{A_c U_L} \left(1 - e^{-(A_c U_L F') / \dot{m} C_a} \right) \quad (8)$$

sendo F_r e C_a o fator de remoção do coletor e o calor específico do ar, respectivamente.

A temperatura do ar na saída do coletor solar é desenvolvida no anexo 2:

$$T_s = T_a + \frac{S}{U_L} \left(1 - e^{-(A_c U_L F') / \dot{m} C_a} \right) \quad (9)$$

A energia útil do coletor solar é obtida da equação:

$$Q_u = \dot{m} C_a (T_s - T_a)$$

Pode-se determinar a energia útil do coletor solar, as temperaturas dos seus componentes e do fluido através das equações acima citadas e com o auxílio de computador (Anexo 4).

Estes cálculos são feitos utilizando-se os dados climatológicos de temperatura ambiente, umidade relativa e radiação solar arquivados, como já foi mostrado na Capítulo 2.

Estes valores climatológicos correspondem a cada 3 minutos a partir do nascer do sol, e foram lidos no Instituto Agronômico de Campinas. A partir do pôr do sol, os valores arquivados são os valores de cada uma hora, e para a obtenção de dados para cada 3 minutos são feitas interpolações entre cada dois valores consecutivos. Após o pôr do sol os valores de radiação solar incidentes são nulos.

3.5. Radiação solar sobre a superfície do coletor solar:

Para a obtenção da radiação solar na superfície do coletor, deve-se calcular o fator R de conversão de radiação em superfície horizontal para radiação em superfície inclinada [9].

$$R = \frac{\cos(\phi-i) \cos\delta \cos\omega + \sin(\phi-i) \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta}$$

A radiação solar absorvida pela superfície do coletor é dada pela seguinte equação:

$$S = SH \cdot R \cdot \alpha$$

sendo:

SH = radiação solar incidente em superfície horizontal

α = fator de absorção da superfície absorvente

ϕ = latitude do local

i = inclinação do coletor solar

δ = declinação, ou seja, posição angular do sol no meio dia solar, com respeito ao plano do equador

ω = ângulo horário (anexo 3)

A declinação pode ser calculada pela equação:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[\frac{360 \cdot (284 + n)}{365} \right] ,$$

onde n é o número de dias transcorridos no ano.

3.6. Razão de mistura e vazão do ar:

Para cada valor de temperatura ambiente lido, calcula-se a pressão de vapor saturado correspondente:

$$P_{vs} = \exp \left[54.63 - \frac{12301,69}{T_a \cdot 1,8 + 492} - 5,19 \ln (T_a \cdot 1,8 + 492) \right]$$

Com a pressão de vapor saturado (P_{vs}) calculada, e a umidade relativa (UR) lida, determina-se a razão de mistura do ar (RM), cujo valor será o mesmo na saída do coletor, e conseqüentemente, na entrada do secador.

A razão de mistura é determinada da seguinte maneira:

$$RM = \frac{0.622 \cdot UR \cdot P_{vs}}{P_{atm} - UR \cdot P_{vs}}$$

Deste modo, estão calculadas a temperatura e razão de mistura do ar na saída do coletor solar para cada 3 minutos. Estes valores são arquivados pelo computador para serem usados, posterior

mente , na simulação matemática de secagem.

Para obter-se a vazão mássica do ar na entrada do coletor, deve-se determinar o volume específico desse ar:

$$V_s = \frac{R_a \cdot T_a}{P_{atm} (1 + 1.608 \text{ RM})} ,$$

R_a é a constante para o ar seco e P_{atm} a pressão atmosférica local.

Pode-se, portanto, calcular a vazão mássica, a partir da vazão volumétrica e do volume específico:

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{V_s}$$

3.7. Rendimentos do coletor solar:

Rendimento instantâneo, η_{ins} , corresponde à energia útil em relação à energia recebida no referido instante [9].

$$\eta_{ins} = \frac{Q_u}{A_c \cdot SH \cdot R}$$

Rendimento solar diário, η_d , corresponde a energia útil em relação a energia total recebida, desde o instante do nascimento do sol, t_1 , até o pôr do sol, t_2 [9].

$$\eta_{sd} = \frac{\sum_{t_1}^{t_2} Q_u}{\sum_{t_1}^{t_2} A_c \cdot SH \cdot R}$$

Após o pôr do sol a energia útil fica nula, com a temperatura do ar na saída do coletor solar igualando-se à temperatura do ar de entrada.

4. ESTUDO DO COLETOR SOLAR EM REGIME TRANSITÓRIO:

Quando as condições do meio que envolve um sistema são subitamente mudadas (aquecimento ou resfriamento), um certo intervalo de tempo transcorrerá até que uma condição de equilíbrio seja estabelecida no sistema.

Esta etapa, até se atingir o estado de equilíbrio, corresponde a um regime transitório do sistema cuja temperatura é função simultânea da linha geométrica considerada e do tempo.

Quando o coletor solar é submetido a um aquecimento por radiação solar, ele continua a se aquecer até o equilíbrio, ao mesmo tempo em que libera calor para uso (secagem no nosso caso) [12 , 21].

No decorrer do processo, se a radiação solar deixa de ocorrer devido às nuvens, as partes do coletor começam a se resfriar.

Este fenômeno passa-se mais lentamente para os materiais cuja capacidade térmica são maiores.

Assim o regime transitório simula o caso mais real , mostrando que o coletor solar reserva ou libera calor dependendo das variações das condições externas [6,9,14,22]. A simulação matemãtica do coletor em regime transitório está desenvolvida no anexo 5.

4.1. Balanco de energia em regime transitório:

A espessura do isolante foi dividida em n camadas, a fim de que pudéssemos incluir o processo de transmissão de calor em regime transitório ao balanço total de energia do coletor solar (Figura 9).

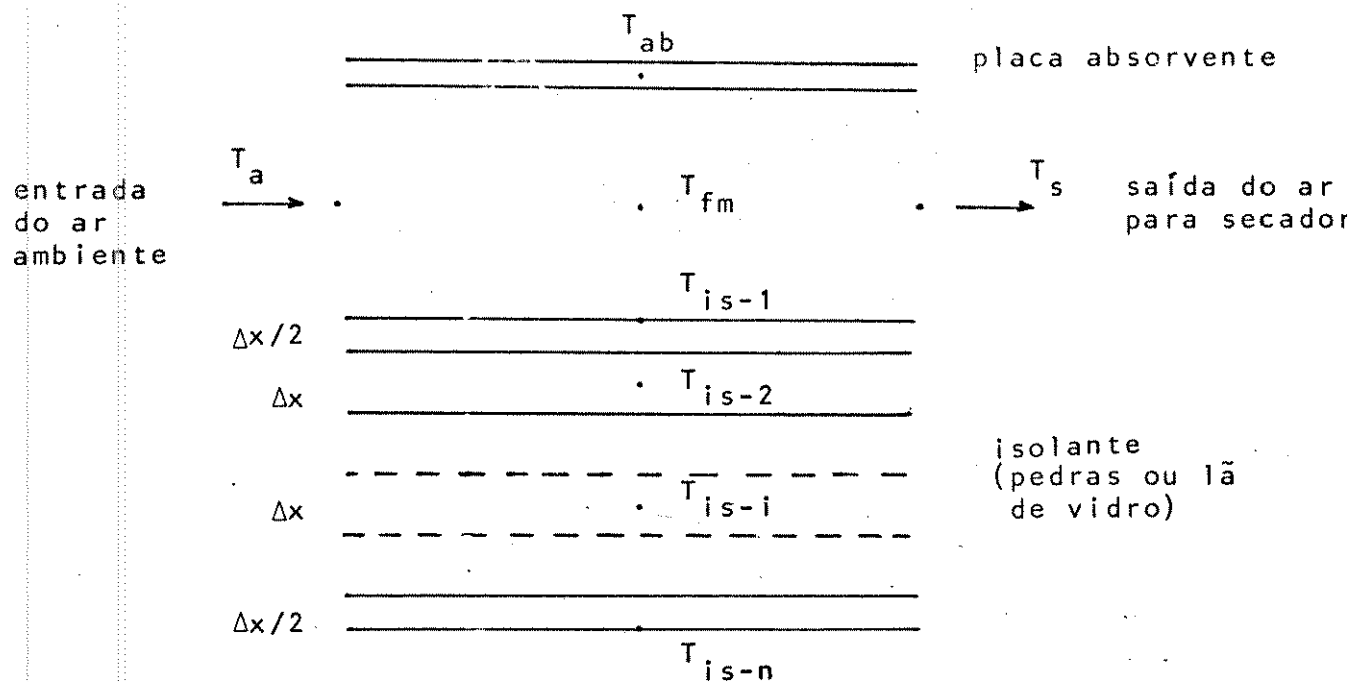


Figura 9. Esquema do coletor solar admitindo-se a divisão do isolante em n camadas

Existem duas equações principais de balanço de energia, uma da placa absorvente, outra do ar [9].

Para a placa absorvente:

$$(mC)_{ab} \frac{dT_{ab}}{dt} = [S - U_t(T_{ab} - T_a) - h_1(T_{ab} - T_{fm}) - h_{r,ab-is}(T_{ab} - T_{is})]A_c \quad (1)$$

$(mC)_{ab}$ sendo a capacidade térmica da placa absorvente, com sua massa, m , e seu calor específico C_{ab} .

Para o ar:

$$\dot{m} C_a (T_s - T_a) = A_c h_1 (T_{ab} - T_{fm}) - A_c h_2 (T_{fm} - T_{is}) \quad (2)$$

4.2. Temperaturas médias dos componentes:

A partir da equação (1) do balanço de energia, obtém-se a temperatura da placa absorvente:

$$T_{ab,t+\Delta t} = T_{ab,t} + \frac{\Delta t A_c}{(mC)_{ab}} [S - U_t (T_{ab,t} - T_{a,t}) - h_1 (T_{ab,t} - T_{fm,t}) - h_{r,ab-is} (T_{ab,t} - T_{is-1,t})] \quad (1')$$

Da equação (2) tira-se a temperatura de saída do ar:

$$T_{s,t+\Delta t} = \frac{A_c}{\dot{m} C_a} [h_1 (T_{ab,t+\Delta t} - T_{fm,t+\Delta t}) - h_2 (T_{fm,t+\Delta t} - T_{is-1,t+\Delta t})] + T_{a,t+\Delta t} \quad (2')$$

Para o estudo da temperatura do isolante, dividimos este em n camadas, ficando a camada 1 em contato com o fluido cuja temperatura é T_f , e a camada n em contato com o ar ambiente cuja temperatura é T_a .

O seguinte balanço de energia é feito para o isolante:

Para a superfície superior do isolante:

$$\frac{\rho_{is} C_{is} A_c \Delta x}{2 \Delta t} (T_{is-1,t+\Delta t} - T_{is-1,t}) = h_2 A_c (T_{fm,t} - T_{is-1,t}) + h_{r,ab-is} A_c (T_{ab,t} - T_{is-1,t}) + \frac{\lambda_{is} A_c}{\Delta x} \cdot (T_{is-2,t} - T_{is-1,t})$$

onde:

ρ_{is} = densidade do isolante

C_{is} = calor específico do isolante

λ_{is} = condutividade térmica do isolante

Δt = acréscimo de tempo

Δx = espessura da camada elementar

T_{is-1} e T_{is-2} = temperaturas das camadas 1 e 2 do isolante, respectivamente.

Multiplicando-se a equação acima por $\Delta x / \lambda_{is} A_c$, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{is} C_{is} (\Delta x)^2}{2 \Delta t \lambda_{is}} (T_{is-1,t+\Delta t} - T_{is-1,t}) &= \frac{h_2 \Delta x}{\lambda_{is}} (T_{fm,t} - \\ &- T_{is-1,t}) + \frac{h_{r,ab-is} \Delta x}{\lambda_{is}} (T_{ab,t} - T_{is-1,t}) + \\ &(T_{is-2,t} - T_{is-1,t}) \end{aligned}$$

Fazendo-se:

$$M = \frac{2 \lambda_{is} \Delta t}{\rho_{is} C_{is} (\Delta x)^2}, \quad N = \frac{h_2 \Delta x}{\lambda_{is}} \quad \text{e} \quad P = \frac{h_{r,ab-is} \Delta x}{\lambda_{is}}$$

obtém-se a temperatura da superfície superior do isolante:

$$\begin{aligned} T_{is-1,t+\Delta t} &= MNT_{fm,t} + MPT_{ab,t} + MT_{is-2,t} + \\ &+ (1 - MN - MP - M) T_{is-1,t} \end{aligned}$$

Para as camadas internas do isolante ($i = 2, 3, \dots, n-1$):

$$\frac{\rho_{is} C_{is} S \Delta x}{\Delta t} (T_{is-i,t+\Delta t} - T_{is-i,t}) = \frac{\lambda_{is} S}{\Delta x} (T_{is-i-1,t} - T_{is-i,t}) + \frac{\lambda_{is} S}{\Delta x} (T_{is-i+1,t} - T_{is-i,t})$$

Algebricamente, como foi feito para a superfície superior obtêm-se a temperatura das camadas internas do isolante:

$$T_{is-i,t+\Delta t} = \frac{M}{2} (T_{is-i-1,t} + T_{is-i+1,t}) + (1-M) T_{is-i,t}$$

Para a superfície externa do isolante:

$$\frac{\rho_{is} C_{is} \Delta x}{2 \Delta t} (T_{is-n,t+\Delta t} - T_{is-n,t}) = \frac{\lambda_{is} S}{\Delta x} (T_{is-n-1,t} - T_{is-n,t}) + h_c (T_{a,t} - T_{is-n,t}) S + h_{r,is-ar} (T_{a,t} - T_{is-n,t}) \cdot S$$

Similar ao que foi feito para as outras camadas, e fazendo-se $D = \Delta x / \lambda_{is} (h_c + h_{r,is-a})$, tira-se a temperatura da superfície externa do isolante:

$$T_{is-n,t+\Delta t} = M T_{is-n-1,t} + MD T_{a,t} + (1 - M - MD) \cdot T_{is-n,t}$$

Para resolver numericamente os balanços de energia em regime transitório mostrados acima, é preciso desenvolver um outro balanço.

Sendo L o comprimento total do coletor solar, T_a a temperatura do ar na entrada do coletor e T_s a temperatura de saída, denominou-se x a distância através do coletor a qual dá a temperatura do fluido T_f . Adicionando-se a essa distância x um incremento dx

A potência por unidade de área do coletor solar se torna:

$$dq_u = h_1 (\theta_e - T_f) \frac{W dx}{A_c} \quad (6)$$

Por outro lado, a partir da equação (4),

$$dq_u = \frac{\dot{m} C_a dT_f}{A_c}$$

Igualando-se (6) e (7):

$$\frac{dT_f}{(\theta_e - T_f)} = \frac{h_1 A_c}{\dot{m} C_a L} dx$$

Integrando:

$$\int_{T_a}^{T_f} \frac{dT_f}{(\theta_e - T_f)} = \int_0^x \frac{h_1 A_c}{\dot{m} C_a L} dx$$

$$\theta_e - T_f = (\theta_e - T_a) e^{-(h_1 A_c x) / (\dot{m} C_a L)}$$

Para $x = L$, $T_f = T_s$, então:

$$\theta_e - T_s = (\theta_e - T_a) \cdot e^{-(h_1 A_c) / (\dot{m} C_a)}$$

Como $\theta_e = T_{ab} - T_{fm} + T_{is-1}$, a equação acima se transforma em:

$$T_{ab} - T_{fm} + T_{is-1} - T_s = (T_{ab} - T_{fm} + T_{is-1} - T_a) \cdot e^{-(h_1 A_c) / (\dot{m} C_a)} \quad (8)$$

A partir da equação (8), a temperatura de saída do ar é dada por:

$$T_s = (T_{ab} - T_{fm} + T_{is-1}) - (T_{ab} - T_{fm} + T_{is-1} - T_a) \cdot e^{-(h_1 A_c)/(\dot{m} C_a)} \quad (9)$$

Fazendo-se (2') = (9):

$$\begin{aligned} & \frac{A_c h_1}{\dot{m} C_a} T_{ab} - \frac{A_c h_1}{\dot{m} C_a} T_{fm} - \frac{A_c h_2}{\dot{m} C_a} T_{fm} + \\ & + \frac{A_c h_2}{\dot{m} C_a} T_{is-1} + T_a = T_{ab} - T_{fm} + T_{is-1} - \\ & - (T_{ab} + T_{is-1} - T_a) \cdot e^{-(h_1 A_c)/(\dot{m} C_a)} + T_{fm} \cdot e^{-(h_1 A_c)/(\dot{m} C_a)} \end{aligned}$$

Sendo

$$r = \frac{A_c h_1}{\dot{m} C_a} = \frac{A_c h_2}{\dot{m} C_a},$$

a equação é simplificada para:

$$r(T_{ab} + T_{is-1}) + T_a - T_{ab} - T_{is-1} + (T_{ab} + T_{is-1} - T_a) \cdot$$

$$e^{-r} - 2r T_{fm} + T_{fm} - T_{fm} \cdot e^{-r} = 0$$

A temperatura média do fluido passa portanto a ser:

$$T_{fm} = \frac{(r - 1 + e^{-r}) \cdot (T_{ab} + T_{is-1}) + (1 - e^{-r}) T_a}{2r - 1 + e^{-r}}$$

4.3. RENDIMENTOS DO COLETOR SOLAR EM REGIME TRANSITÓRIO

Obtêm-se três rendimentos diferentes do coletor solar: o rendimento solar instantâneo, o rendimento solar diário e o rendimento solar útil diário [9].

Rendimento solar instantâneo:

Corresponde à energia útil em relação à energia recebida no referido instante.

$$\eta_{ins} = \frac{Q_u}{A_c (SH + R + CC + CB)}$$

em que:

$$CC = (h_w + h_{r, is-a}) (T_{a,t} - T_{is-n,t})$$

$$CB = U_t (T_{a,t} - T_{ab,t})$$

onde

CC é a troca de energia entre o ambiente e o isolante

CB é a troca de energia entre o ambiente e o absorvente

Rendimento solar diário:

Corresponde à energia útil em relação à energia total recebida desde o instante do nascimento do sol, t_1 , até o pôr do sol, t_2 .

$$\eta_{s,d} = \frac{\sum_{t_1}^{t_2} Q_u}{\sum_{t_1}^{t_2} A_c (SH + R + CC + CB)}$$

Rendimento útil diário:

Corresponde à energia útil em relação à energia total recebida, desde o nascimento do sol, t_1 , até o instante em que a energia armazenada no isolante seja totalmente retirada, t_3 (considerado 22 horas).

$$\eta_{u,d} = \frac{\sum_{t_1}^{t_3} Q_u}{\sum_{t_1}^{t_3} A_c (SHR + CC + CB)}$$

4.4. Energia armazenada:

A energia armazenada, e portanto disponível ao pôr do sol, corresponde à energia total recebida pelo coletor solar desde o nascimento até o pôr do sol, menos a quantidade de energia ganha pelo fluido e destinada à secagem durante este intervalo de tempo [9].

$$ARM = \sum_{t_1}^{t_2} [A_c (SHR\alpha + CC + CB) - \dot{m} C_a (T_{s,t} - T_{a,t})]$$

Nas equações acima os termos CC e CB são nulos quando a temperatura $T_{a,t}$ é inferior a $T_{is-n,t}$ ou $T_{ab,t}$, exceto a equação de ARM.

Após o pôr do sol, parte da energia armazenada é distribuída para uso, porém uma outra parte é perdida pelos dois lados do coletor solar, ou seja, pela placa absorvente e pela superfície inferior do isolante. A porção de energia para uso é dada por:

$$\eta_{arm} = \left[\sum_{t_2}^{t_3} \dot{m} C_a (T_{s,t} - T_{a,t}) \right] / ARM$$

Como no caso do regime permanente (Capítulo III), após os cálculos das temperaturas do ar de saída (TS) e razões de mistura (RM), obtidos para cada 3 minutos, estes valores são arquivados pa ra poderem ser utilizados posteriormente na simulação matemática de secagem. (anexo 6).

5. SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DE SECAGEM A BAIXAS TEMPERATURAS PELO MODELO DE MOREY:

Como já foi visto nos Capítulos 3 e 4, as temperaturas e razões de mistura do ar de saída do coletor solar obtidos para os regimes permanente e transitório foram arquivados para serem utilizados na simulação de secagem.

À temperatura do ar de saída do coletor foi adicionado 1.5°C devido ao aquecimento ocasionado pelo ventilador. A razão de mistura do ar na entrada do secador é a mesma da saída do coletor.

Para a simulação de secagem utilizou-se o modelo proposto por Morey [15]. Este modelo vem a ser um aperfeiçoamento do modelo de Thompson a baixas temperaturas com adição da equação de camada delgada [17].

O modelo de Thompson foi desenvolvido para simular a secagem com temperaturas próximas à ambiente [18,22]. Geralmente, um sistema de coletor solar plano tendo o ar como fluido pode aquecer este ar até 20°C acima da temperatura do ar ambiente.

Assim, secagem com coletor solar pode ser considerada como uma secagem a baixa temperatura.

O modelo de Thompson parte da hipótese que após um intervalo de tempo Δt , o produto e o ar entram em equilíbrio.

Para encontrar as condições de equilíbrio entre o ar e o produto, é necessário solucionar um sistema de equações que envolve os seguintes balanços [18,5] :

5.1. Balanco de energia entre o ar e o produto:

$$0.24 T_0 + RM_0(588 + 0,45 T_0) + C T_{g0} + (RM_f - RM_0) \cdot$$

$$T_{g0} = 0,24 T_f + RM_f(588 + 0,45 T_f) + C T_f +$$

$$\Delta h_{fg}(RM_f - RM_0) \quad (1)$$

onde:

T_0 = temperatura do ar no instante t ($^{\circ}\text{C}$)

RM_0 = razão de mistura do ar no instante t (kg água/kg ar seco)

C = calor específico do produto convertido para kcal/kg ar seco $^{\circ}\text{C}$

T_{g0} = temperatura do produto no instante t ($^{\circ}\text{C}$)

T_f = temperatura do ar e do produto no instante $t+\Delta t$ ($^{\circ}\text{C}$)

RM_f = razão de mistura do ar no instante $t+\Delta t$ (kg água/kg ar seco)

Δh_{fg} = aumento do calor latente de vaporização (kcal/kg)

5.2. Balanco de massa entre o ar e o produto:

$$RM_f - RM_0 = \frac{(U - U_f) R}{100} \quad (2)$$

onde:

U = teor de umidade do produto no instante t (% bs)

U_f = teor de umidade do produto no instante $t+\Delta t$ (% bs)

R = razão de massa de matéria seca por massa de ar seco

A razão de massa de matéria seca por massa de ar seco é dada pela equação:

$$R = \frac{\rho_p \cdot v_s \cdot A \cdot \ell}{\dot{v} \cdot \Delta t \cdot n \cdot 60}$$

sendo que:

ρ_p = densidade de matéria seca (kg/m^3)

v_s = volume específico do ar de entrada (m^3/kg)

A = área da secção transversal do silo (m^2)

ℓ = altura total da camada de produto (m)

\dot{v} = vazão volumétrica do ar de entrada no silo (m^3/min)

Δt = intervalo de tempo (horas)

n = número de camadas

A densidade de matéria seca é obtida pela seguinte equação:

$$\rho_p = \frac{100 \cdot P}{100 + U_0}$$

sendo P e U_0 o peso específico (kg/m^3) e a umidade inicial do produto (% bs), respectivamente.

A pressão de vapor do ar (em mmHg) é calculada com os valores de razão de mistura do ar de entrada (RM_e), e a pressão atmosférica local (P_{atm}) em mmHg.

$$P_v = \frac{RM_e \cdot P_{atm}}{(RM_e + 0,622)}$$

O volume específico do ar de entrada é obtido da equação:

$$v_s = \frac{R_a \cdot (T_e + 273,16)}{133,322(P_{atm} - P_v)}$$

sendo R_a a constante para o ar seco (287 J/kg K) e T_e a temperatura do ar de entrada ($^{\circ}\text{C}$).

Pela equação proposta por Thompson et alii [23], calcula-se o aumento do calor latente de vaporização da água do milho:

$$\Delta h_{fg} = (606 - 0,57T_0) \cdot 4,35 \cdot \exp(-0,2825U)$$

O calor específico do milho (em função do teor de umidade do produto) é dado por [18,19]:

$$c = \frac{(0,35 + 0,851 \cdot 0,01 U)}{1 - 0,01 U}$$

O calor específico do milho convertido para (kcal/kg ar seco °C) é obtido de:

$$c = c \cdot R$$

5.3. Umidade Relativa do ar:

A umidade relativa do ar de secagem (UR), é calculada da seguinte maneira:

$$UR_{ar} = \frac{P_{atm} \cdot RM_o}{(RM_o + 0,622) \cdot P_{vs}}$$

sendo P_{vs} a pressão de vapor de saturação à temperatura do ar (mmHg).

Se a umidade relativa do ar de secagem calculada for maior ou igual a 100%, considera-se 99%.

A pressão de vapor de saturação é tirada da equação de Wexler e Greenspan, citada por Wilhelm [25], onde T_0 é a temperatura do ar (K)

$$\begin{aligned} P_{vs} = & 7.5006 - \exp \left(- \frac{7511.52}{T} + 89.63121 + 0,02399897T - \right. \\ & - 1.11654551 \cdot 10^{-5} T_0^2 - 1.2810336 \cdot 10^{-8} T_0^3 + \\ & \left. + 2.0998405 \cdot 10^{-11} T_0^4 - 12.150799 \ln(T_0) \right) \end{aligned}$$

5.4. Umidade relativa de equilíbrio para o produto:

Na situação de secagem:

A umidade relativa de equilíbrio para o produto, que neste caso é o milho (URE_s), dada em %, é a seguinte:

$$URE_s = 1 - \exp[-3,82 \cdot 10^{-5} \cdot (1,8T_0 + 82) \cdot U^2] ,$$

sendo U e T_0 o teor de umidade (% bs) e a temperatura do ar ($^{\circ}C$), respectivamente.

Na situação de reumidificação:

A umidade relativa de equilíbrio do produto (milho), considerando-se umidificação é dada por:

$$URE_u = 1 - \exp[-1,045 \cdot 10^{-4} \cdot (1,8T + 82) \cdot U^{1,72}]$$

Se $UR_{ar} < URE_s$, trata-se de situação de secagem.

Se $UR_{ar} > URE_u$, trata-se, então, de umidificação.

Se $UR_{ar} = URE$, o produto já está em equilíbrio com o ar.

Quando o equilíbrio ainda não foi atingido, faz-se uso do seguinte artifício para efeito de cálculo pelo computador:

Quando se tratar de situação de secagem, faz-se

$$DEHF = 0.001 \text{ w } RM_f = RM_0 + DEHF$$

onde RM_0 e RM_f são as razões de mistura do ar no instante t e no instante $t + \Delta t$, respectivamente.

Quando se tratar de umidificação, faz-se

$$DEHF = -0.001 \text{ e } RM_f = RM_0 + DEHF$$

A temperatura do ar (T_f) é calculada pela equação seguinte, obtida a partir do balanço de energia (1).

$$T_f = \frac{0,24 T_0 + RM_0(588 + 0,45T_0) + C T_{g0} + (RM_f - RM_0)T_{g0} - 588 RM_f - \Delta h_f (RM_f - RM_0)}{0,24 + 0,45 RM_f + C} \quad (1')$$

A umidade do grão é tirada pelo balanço de massa (2):

$$U_f = U - \frac{RM_f - RM_0}{R} \quad (2')$$

com os valores acima calculados de RM_f , T_f e U_f , calcula-se novamente URE_s e UR_{ar} (para o caso de secagem) e URE_u e UR_{ar} (para o caso de umidificação), da mesma maneira feita anteriormente.

Este processo iterativo continuará, até que seja satisfeita a condição, $-0,005 < URE_s - UR_{ar} < 0,005$, para o caso de secagem, e $-0,005 < UR_{ar} - URE_u < 0,005$, para o caso de umificação.

5.5. Equação de camada delgada:

O modelo de Thompson, operando em condições onde o ar e o produto não atingem o equilíbrio, tende a superestimar a secagem.

Para melhor simular a secagem por camadas, Morey et alii [1] incorporaram ao modelo uma equação empírica de secagem para camada delgada, que prevê a perda de umidade do grão.

A equação escolhida foi a de Misra e Brooker, obtida para temperaturas de 21 a 43°C. Esta equação, para o produto milho, é a seguinte:

$$RU = \exp(-k t^n)$$

em que:

RU = razão de umidade do produto.

t = tempo (horas)

$$k = 0.0821 + 1,37 \cdot 10^{-2} T - 1.31 \cdot 10^{-4} T^2$$

$$n = 0.375 + 8,76 \cdot 10^{-2} \ln (UR)$$

T = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)

UR = umidade relativa do ar (%)

A razão de umidade do produto vem a ser:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e},$$

sendo U_0 e U_e o teor de umidade inicial do produto e a sua umidade de equilíbrio, respectivamente.

A umidade de equilíbrio para o milho é obtida da equação:

$$U_e = \left(\frac{-\ln(1 - UR_{ar})}{(0,0000382 \cdot (1.8T_0 + 82))} \right)^{1/2}$$

A partir da equação de Misra e Brookes [17], obtém-se o tempo equivalente de secagem:

$$t_{eq} = \left(- \frac{\ln RU}{k} \right)^{1/n}$$

Ao valor de t_{eq} calculado, soma-se o incremento de tempo Δt .

Com o valor de $t = t_{eq} + \Delta t$, na equação de camada delgada tira-se o valor da umidade do grão, que é dado por:

$$U_f = (U_0 - U_e) \exp(-k t^n) + U_e$$

RM_f e T_f são calculados a partir das equações (2') e (1') respectivamente.

Se a umidade do grão obtida pela equação de camada delgada for maior que a umidade obtida pelo método de equilíbrio, considera-se como umidade final do grão a da camada delgada.

Este processo é repetido para todas as camadas de grão e para cada incremento de tempo Δt , até que o teor de umidade final do grão (média das camadas) seja menor que 13% b.u e o teor de umidade máximo (da camada superior) seja menor que 15.5% b.u no final do dia, e menor que 14.5% b.u durante o dia. Este critério para o teor de umidade máximo existe para que não haja deterioração da camada superior.

5.6. Deterioração do milho:

O modelo de Morey também incorpora o mesmo modelo de deterioração usado por Thompson para o milho, baseado no trabalho desenvolvido por Steele.

A perda de matéria seca depende da respiração do produto [17]. O modelo de deterioração prevê a perda de matéria seca do grão como função do tempo que o produto permanece sob determinadas condições de temperatura, teor de umidade e danos mecânicos.

$$PMS = 0.0884[\exp(0.006t - 1)] + 0.00102t$$

sendo:

PMS = % de perda de matéria seca para o milho, com umidade de 25% b.u, temperatura de 15.6°C e 30% de danos.

t = tempo de exposição sob as condições citadas

Para condições diferentes das citadas, deve-se calcular um tempo equivalente (t_{eq}) às condições de referência:

$$t_{eq} = \frac{\Delta t}{M_U \cdot M_T \cdot M_D}$$

onde:

Δt = período de tempo de exposição

M_U = multiplicador de umidade

M_T = multiplicador de temperatura

M_D = multiplicador de danos mecânicos

O multiplicador de temperatura é definido pelas equações:

para $T \leq 15,6^{\circ}\text{C}$ ou $U \leq 19\% \text{ b.u.}$

$$M_T = 128,76 \exp(-0,1458T - 2,592)$$

para $T > 15,6^{\circ}\text{C}$ e $19\% \leq U \leq 28\%$

$$M_T = 32,3 \exp[(-0,1044T - 1,856)] + (U - 0,19) \cdot$$

$$\cdot \exp \left[0,61 \cdot \frac{(1,8T - 28)}{60} \right]$$

para $T > 15,6^{\circ}\text{C}$ e $U \geq 28\%$,

$$M_T = 32,3 \exp(-0,1044T - 1,856) + 0,09 \cdot$$

$$\cdot \exp \left[0,61 \cdot \frac{(1,8T - 28)}{60} \right]$$

sendo T e U a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e o teor de umidade do grão (% b.u), respectivamente.

O multiplicador de umidade é definido:

para $13\% \leq U \leq 28\%$

$$M_U = 0,103 \exp[455/(U)^{1,53}] - 0,00845U + 1,558$$

O multiplicador de danos M_D é assumido como sendo igual a 1.

A perda de matéria seca a cada momento é calculada com o tempo equivalente acumulado até o momento.

Quando PMS atinge o valor de 0,5%, a calculação do processo de secagem ou reumidificação deve cessar, mesmo que o teor de umidade médio de milho ainda esteja maior que 13%.

A perda de 0,5% de matéria seca corresponde,segundo observações de cientistas, à queda de 1 ponto na escala de classificação comercial do milho.

5.7. Paralização do Ventilador:

Durante a noite a temperatura do ar é muito baixa e a umidade relativa muito alta. Este fato não é favorável à secagem. Por isso, deve-se controlar o uso do ventilador para a secagem durante a noite (inclusive até a manhã do dia seguinte).

Quando o teor de umidade médio do milho é maior que 16%b.u, o ventilador deve funcionar sempre, mesmo durante a noite, para resfriar os grãos aquecidos devido à respiração. Entretanto, mesmo que o teor de umidade médio seja menor que 16% b.u, se as camadas inferiores conseguirem secar durante a noite, deixa-se o ventilador funcionar durante a noite seguinte.

Caso contrário, se as camadas inferiores não conseguirem secar durante a noite com o teor de umidade médio menor que 16% b.u, deixa-se o ventilador parado durante a noite (a partir das 20 horas), seguinte.

6. EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO SISTEMA TOTAL:

Após a determinação do modelo matemático para o sistema total, foram simulados alguns casos de secagem, os quais envolvem coletor solar e secador [1,2,3].

Na simulação do coletor solar, variou-se a vazão do fluido, área do coletor, material e espessura do isolante, assim como modelos climatológicos. Todos os demais parâmetros foram fixados. Utilizou-se um intervalo de tempo de 3 minutos, expressando as variações mais próximas das condições reais dos modelos climatológicos.

Para o caso de secagem de produtos agrícolas, utilizou-se o milho em quantidades de 3, 10 e 50 toneladas.

O intervalo de tempo utilizado na secagem foi de três minutos, com temperaturas e razões de mistura obtidas na saída do coletor solar, e de 30 minutos, com as médias das temperaturas e razões de mistura para esse intervalo de tempo.

O intervalo de tempo de 30 minutos foi utilizado para a diminuição do tempo de computação na ocasião da simulação de secagem de grandes quantidades de produtos agrícolas e na secagem com pequenas vazões de ar.

Condições iniciais completas para os cálculos são citadas a seguir:

DADOS DO COLETOR SOLAR:

comprimento : 20 m e largura : 3 m

comprimento : 10 m e largura : 2 m

altura de passagem do ar : 0,1 m

espessura do isolante: pedras : 6 e 15 cm

lâ de vidro: 6 cm
 espessura da placa absorvente (alumínio) : 2 mm
 absorvância e emissividade da placa absorvente: 0,95
 emissividade do isolante: 0,95
 ângulo de inclinação do coletor solar: 30° (ao norte)
 latitude de Campinas: $-22,92^{\circ}$
 longitude de Campinas: $47,08^{\circ}$
 longitude padrão: 45°
 pressão atmosférica: 9601 kgf/m^2
 horário do nascimento e pôr do sol:
 modelo I (11/04/79) 6:24 e 17:54
 modelo II (28/04/79) 6:30 e 17:42
 modelo III (08/05/79) 6:36 e 17:36
 velocidade do vento: 3 m/s
 vazão do ar: $100 \text{ m}^3/\text{min}$, $20 \text{ m}^3/\text{min}$, $6 \text{ m}^3/\text{min}$
 acréscimo de tempo, $\Delta t = 3$ minutos
 espessura da camada elementos, $\Delta x = 3 \text{ cm}$

A condutividade térmica da camada de pedra, ($\lambda = 0,1053 \text{ w/m}^{\circ}\text{C}$), é calculada pela equação:

$$\lambda = \epsilon \lambda_a + (1-\epsilon) \lambda_p$$

sendo ϵ a porosidade da camada de pedra (0,2), λ_a e λ_p ($0,0265 \text{ w/m}^{\circ}\text{C}$ e $0,125 \text{ w/m}^{\circ}\text{C}$) as condutividades térmicas do ar e da pedra, respectivamente [19].

A densidade da camada de pedra, ($\rho = 1888 \text{ kg/m}^3$), é obtida por:

$$\rho = (1-\epsilon) \rho_p$$

sendo ρ_p a densidade da pedra, 2360 kg/m^3 .

O calor específico de pedra é $850 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$.

Para a lâ de vidro, a condutividade térmica, a densidade e o calor específico são $0,041 \text{ w/m}^\circ\text{C}$, 70 kg/m^3 e $657,2 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$, respectivamente [6].

DADOS DE SECAGEM:

quantidade de milho: 3, 10 e 50 toneladas

diâmetro do silo e espessura da camada de milho, respectivamente: 3 ton. : 4,5 e 0,25m

10 ton. : 4,12 e 1,0m

50 ton. : 5,32 e 3,0m

teor de umidade inicial e final do milho: 20% b.u e

13% b.u

vazão do ar: $100 \text{ m}^3/\text{min}$, $20 \text{ m}^3/\text{min}$, $6 \text{ m}^3/\text{min}$

acrêscimo de tempo: $\Delta t = 3 \text{ minutos}$

$\Delta t = 30 \text{ minutos}$

nº de divisões da camada de milho: 10

6.1. Resultados da simulação matemática do coletor solar:

As Figuras 11 e 12 mostram as temperaturas de saída do coletor e do ambiente em função do tempo, no caso do modelo I, vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$, área do coletor de 60 m^2 , com lâ de vidro como isolante, sendo a sua espessura 6 cm, em regimes permanente e transitório, respectivamente.

Pode-se verificar que quando não existem nuvens, as temperaturas de saída nos dois casos são praticamente iguais, devido à pequena capacidade térmica do isolante. Porém, quando as nuvens es

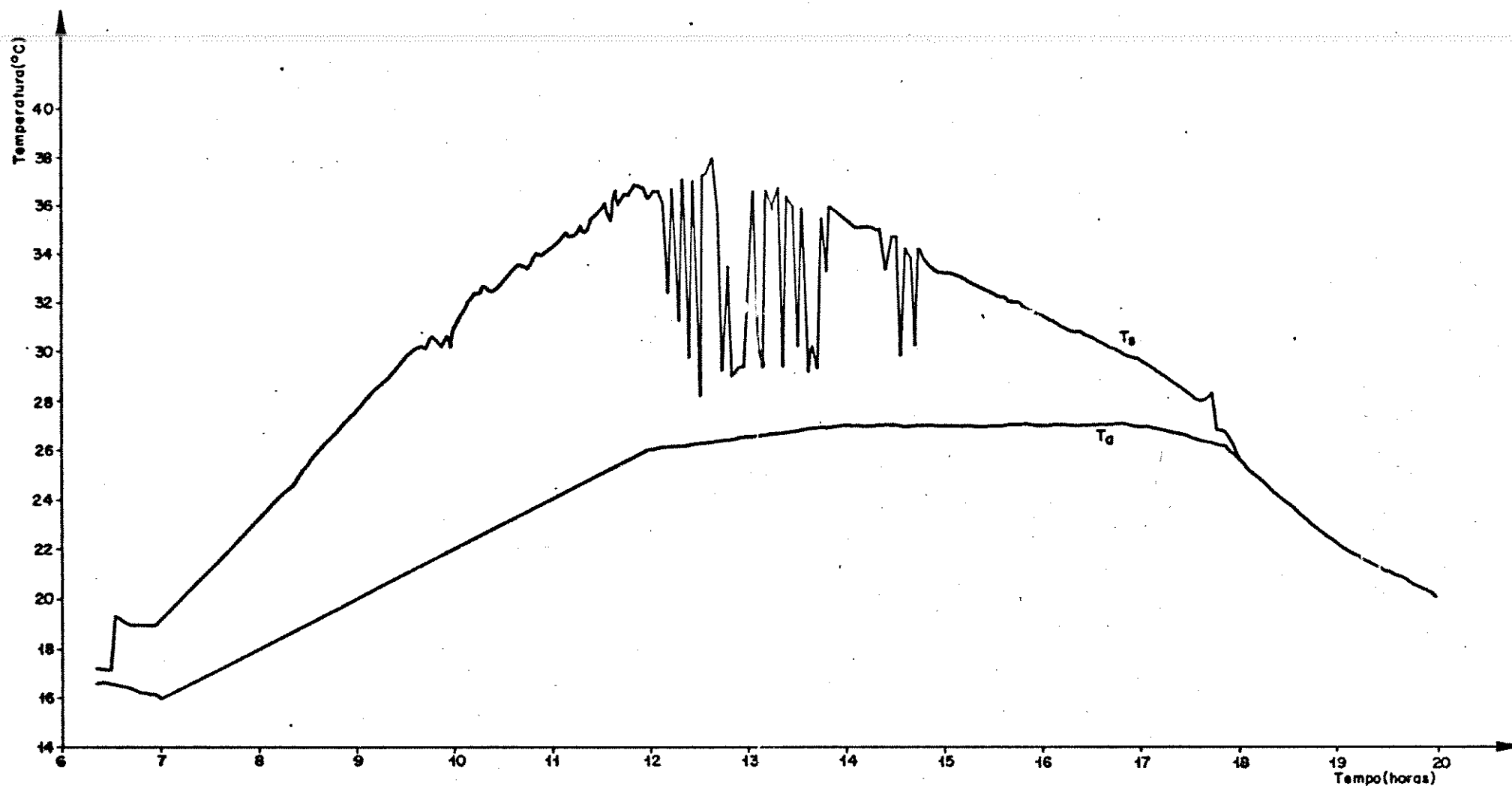


Figura 11. Temperatura ambiente (T_a) e temperatura de saída do coletor solar (T_s), em regime permanente, isolante
lã de vidro (Modelo I), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$, em função do tempo.

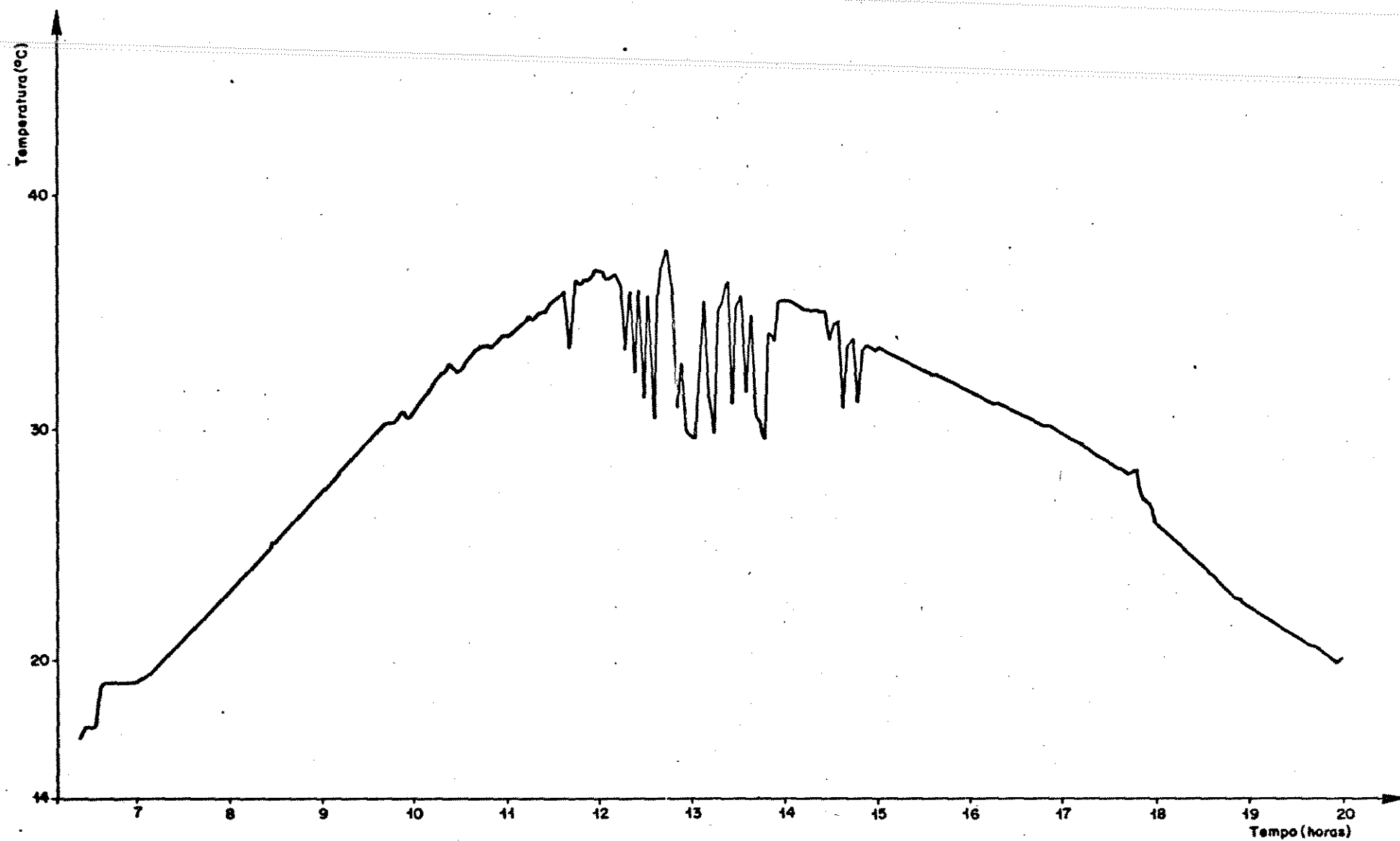


Figura 12. Temperatura de saída do coletor solar (T_s), em regime transitório, isolante lã de vidro, (Modelo I), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$, em função do tempo.

tão presentes, as oscilações das temperaturas de saída no caso de regime transitório são menos bruscas do que no caso do regime permanente, o que é, provavelmente, devido ao calor armazenado na placa absorvente de alumínio e na lâ de vidro.

Pode-se assim verificar que deve-se usar o regime transitório para este tipo de coletor solar, mesmo com lâ de vidro como isolante.

As Figuras 13 e 14 mostram os mesmos dados das figuras anteriores, com pedras como isolante, cuja espessura é de 6 cm, em regimes permanente e transitório, respectivamente.

As curvas de temperaturas de saída do coletor solar em regime permanente para lâ de vidro e pedra como isolantes (Figuras 11 e 13) possuem comportamentos semelhantes, haja visto o não armazenamento de calor, e considerando-se apenas a condutividade dos materiais isolantes.

Com a ausência de nuvens pela manhã, pode-se observar que a temperatura de saída do coletor solar em regime permanente é sempre mais alta que a temperatura de saída do coletor solar em regime transitório, com diferença de mais ou menos um grau centígrado. No período da tarde, quando não existe nuvens, ocorre a inversão das referidas temperaturas.

Isto ocorre porque pela manhã o coletor em regime transitório utiliza parte do calor recebido para aquecimento da chapa absorvente e do isolante, enquanto o regime permanente considera o sistema já em equilíbrio. Pela tarde, o regime transitório apresenta temperaturas de saída mais altas, porque está utilizando o calor que tem armazenado, o que não ocorre no regime permanente.

Verifica-se também que no momento de passagem das nuvens

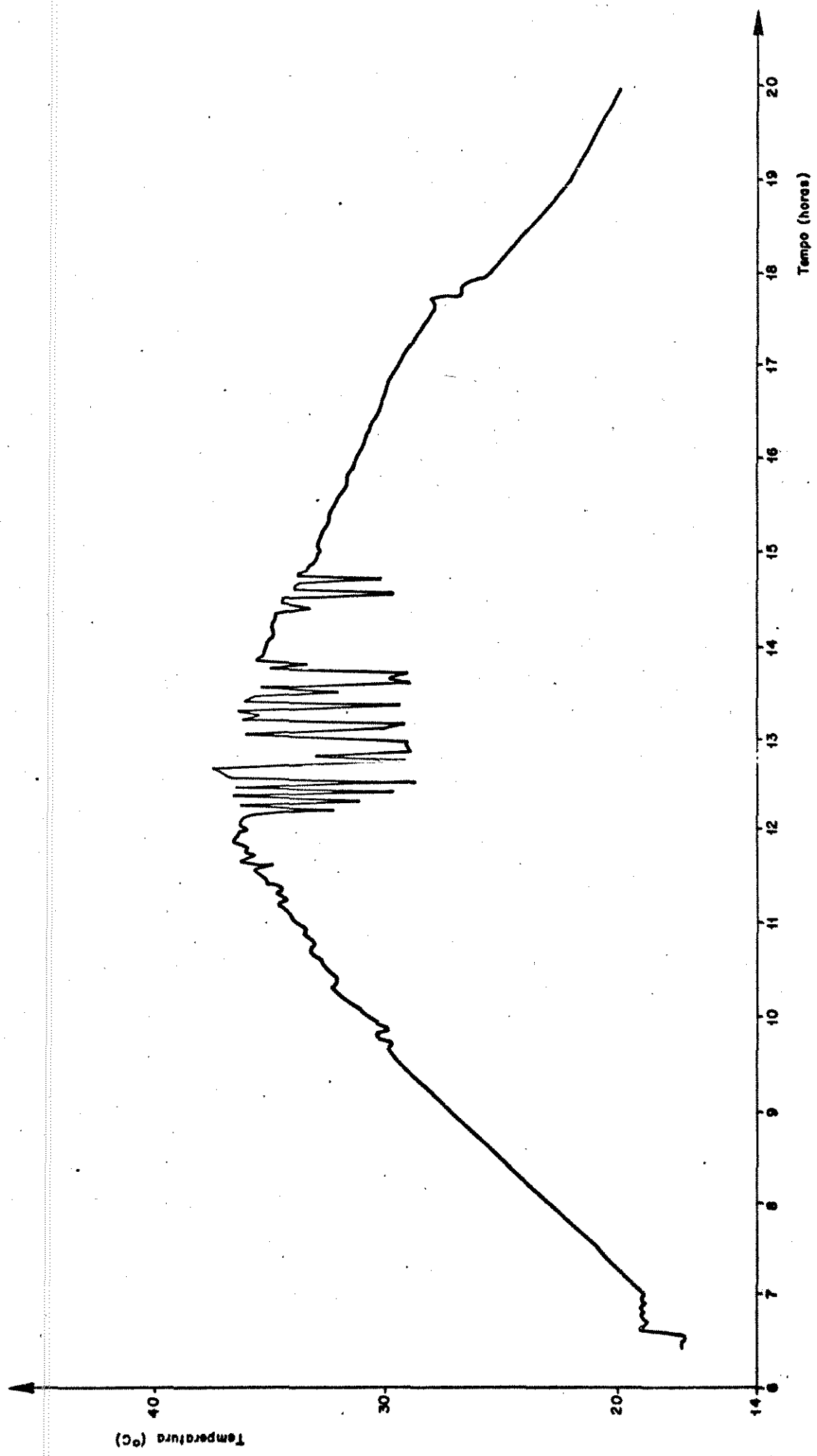


Figura 13. Temperatura de saída do coletor solar (T_s), em regime permanente, isolante pedra, (Modelo I), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$, em função do tempo.

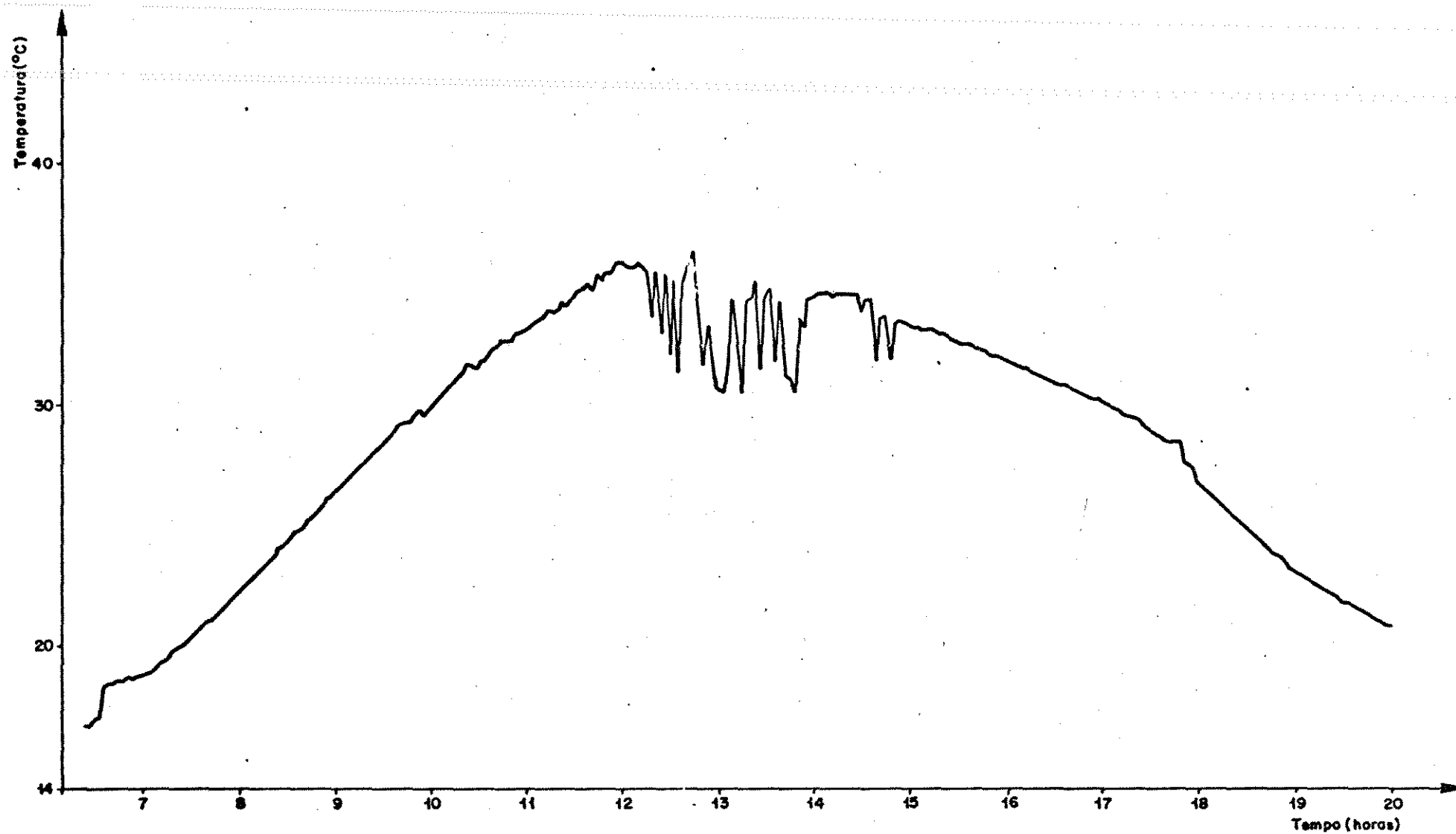


Figura 14. Temperatura de saída do coletor solar (T_s), em regime transitório, isolante pedra, (Modelo I), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$, em função do tempo.

as oscilações ainda são importantes, mesmo com a grande capacidade térmica da pedra como isolante. Isto significa que a diferença de capacidade térmica do isolante não exerce muita influência sobre as oscilações.

Para os modelos II e III, podemos fazer as mesmas considerações do modelo I.

As Figuras 15 e 16 mostram as curvas de temperatura de saída em função do tempo para os modelos II e III, respectivamente, em regime transitório, tendo lã de vidro como isolante.

A Figura 17 mostra a temperatura do isolante lã de vidro com espessura de 6 cm em função do tempo, em regime transitório para o modelo I.

As Figuras 18 e 19 mostram as temperaturas do isolante de pedras em função do tempo para diferentes camadas elementares do isolante, cujas espessuras totais são de 6 cm e 15 cm, respectivamente.

Pelas Figuras 17 e 18 verifica-se que devido a maior capacidade térmica do isolante pedra em relação a lã de vidro, as oscilações das temperaturas do isolante são menores no caso de pedras.

No caso do isolante pedras observa-se também que após as 18 horas, a camada intermediária apresenta uma temperatura do isolante maior que as temperaturas das camadas superior e inferior, enquanto que para a lã de vidro, após o pôr do sol as temperaturas das 3 camadas são praticamente iguais.

As Figuras 20 e 21 mostram as temperaturas do isolante de pedras cujas espessuras são iguais às das Figuras 18 e 19, respectivamente, em função da profundidade da camada para diversos tempos.

Pelas Figuras 18 e 20 para o isolante de 6 cm, observa-se

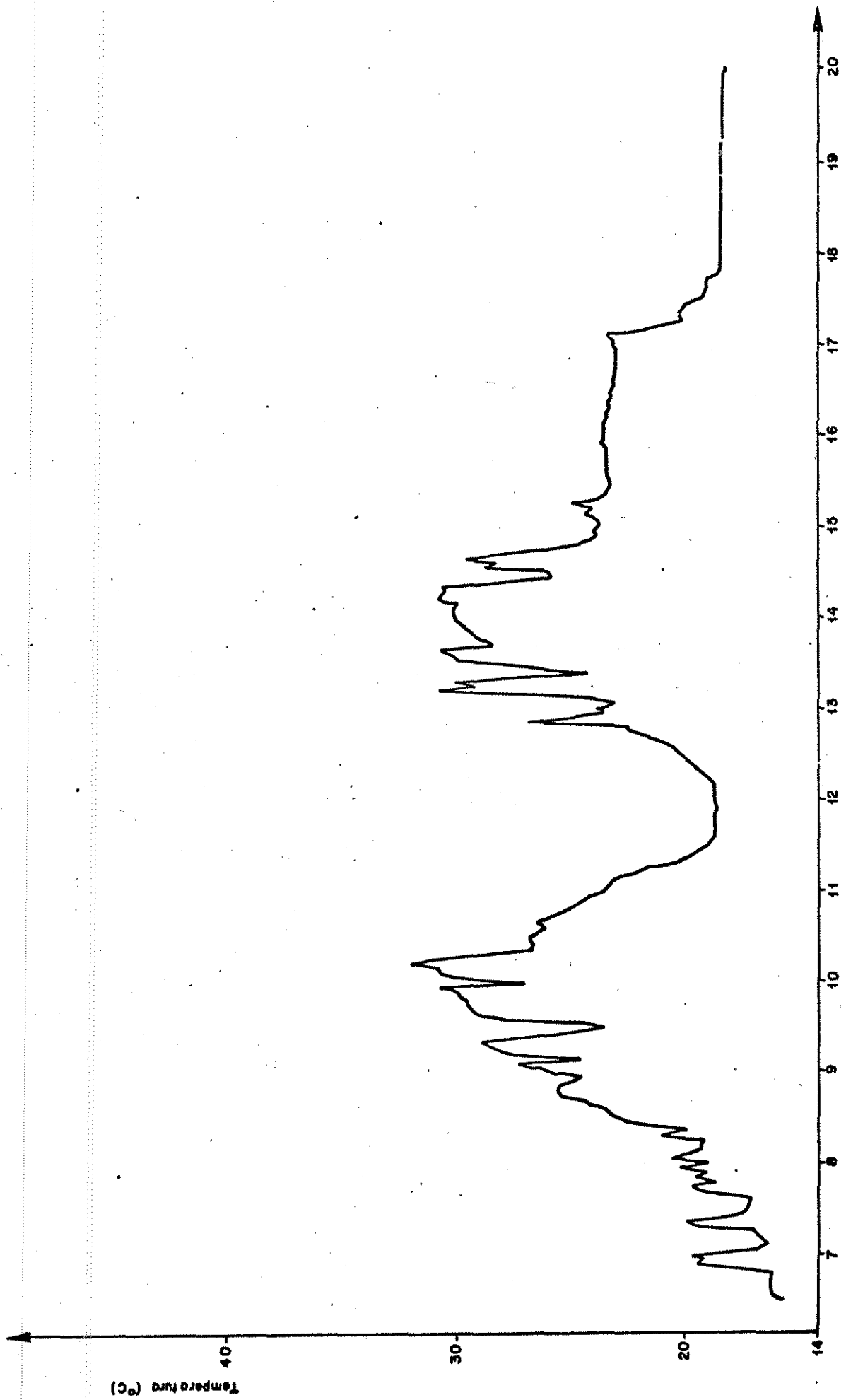


Figura 15. Temperatura de saída do coletor solar (T_s), em regime transitório, isolante lã de vidro, (Modelo II), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$, em função do tempo.

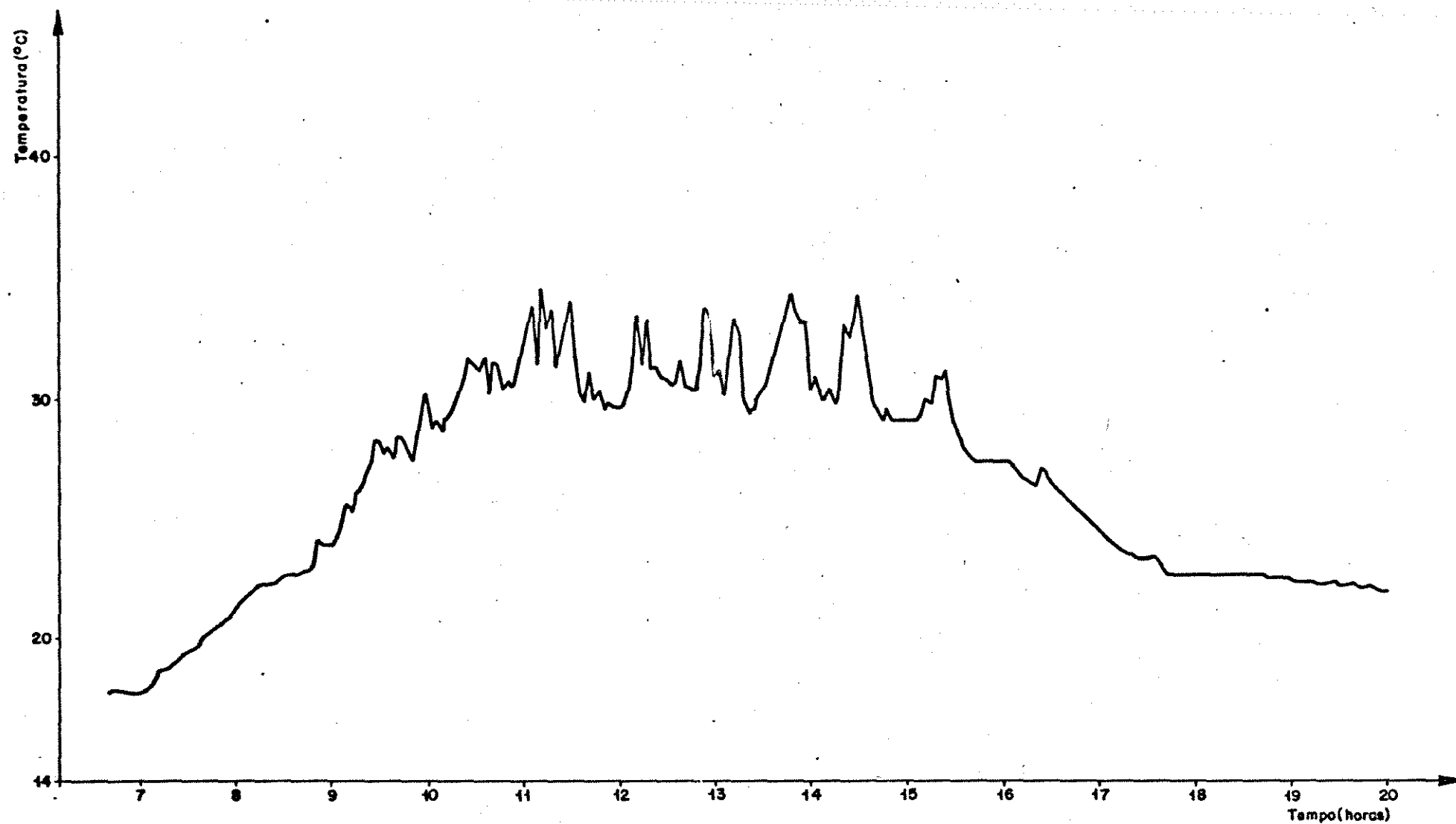


Figura 16. Temperatura de saída do coletor solar (T_s), em regime transitório, isolante lã de vidro, (Modelo III), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$, em função do tempo.

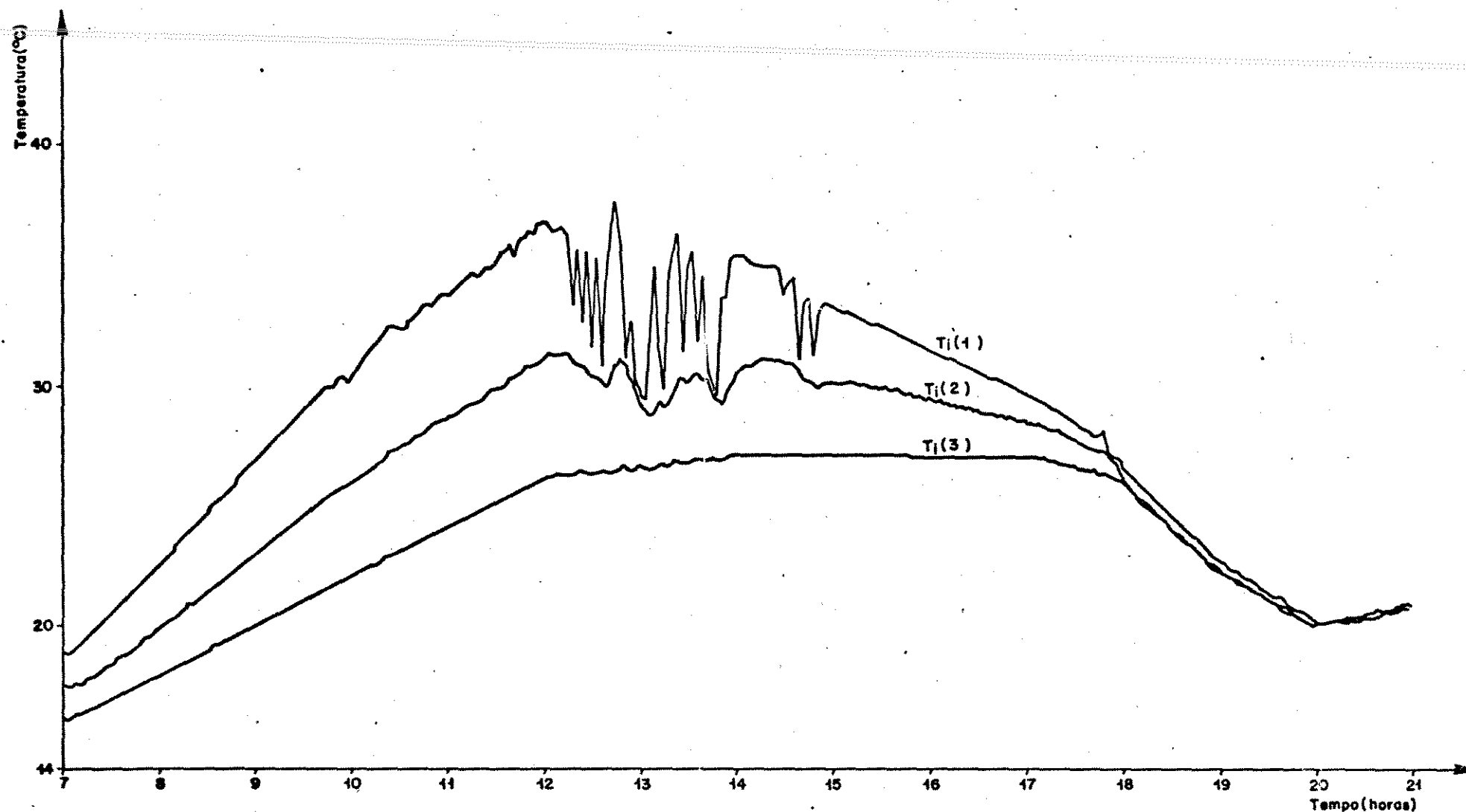


Figura 17. Temperaturas das diferentes camadas elementares do isolante lã de vidro, espessura (6 cm), ($T_i(1)$, $T_i(2)$ e $T_i(3)$), em regime transitório, (Modelo I), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$, em função do tempo.

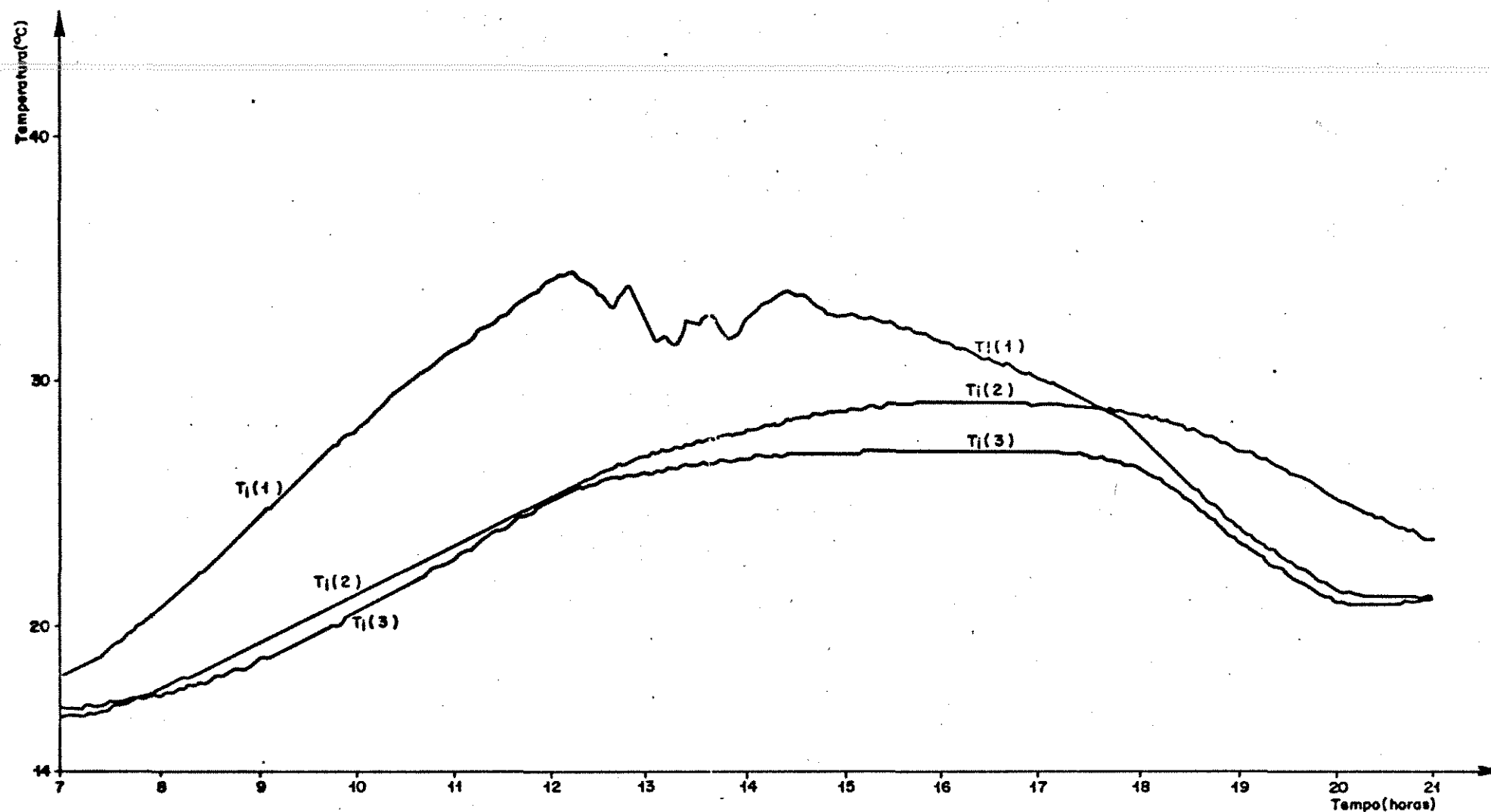


Figura 18. Temperaturas das diferentes camadas elementares do isolante pedra, espessura (6 cm), $T_i(1)$, $T_i(2)$ e $T_i(3)$, em regime transitório, (Modelo I), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$, em função do tempo.

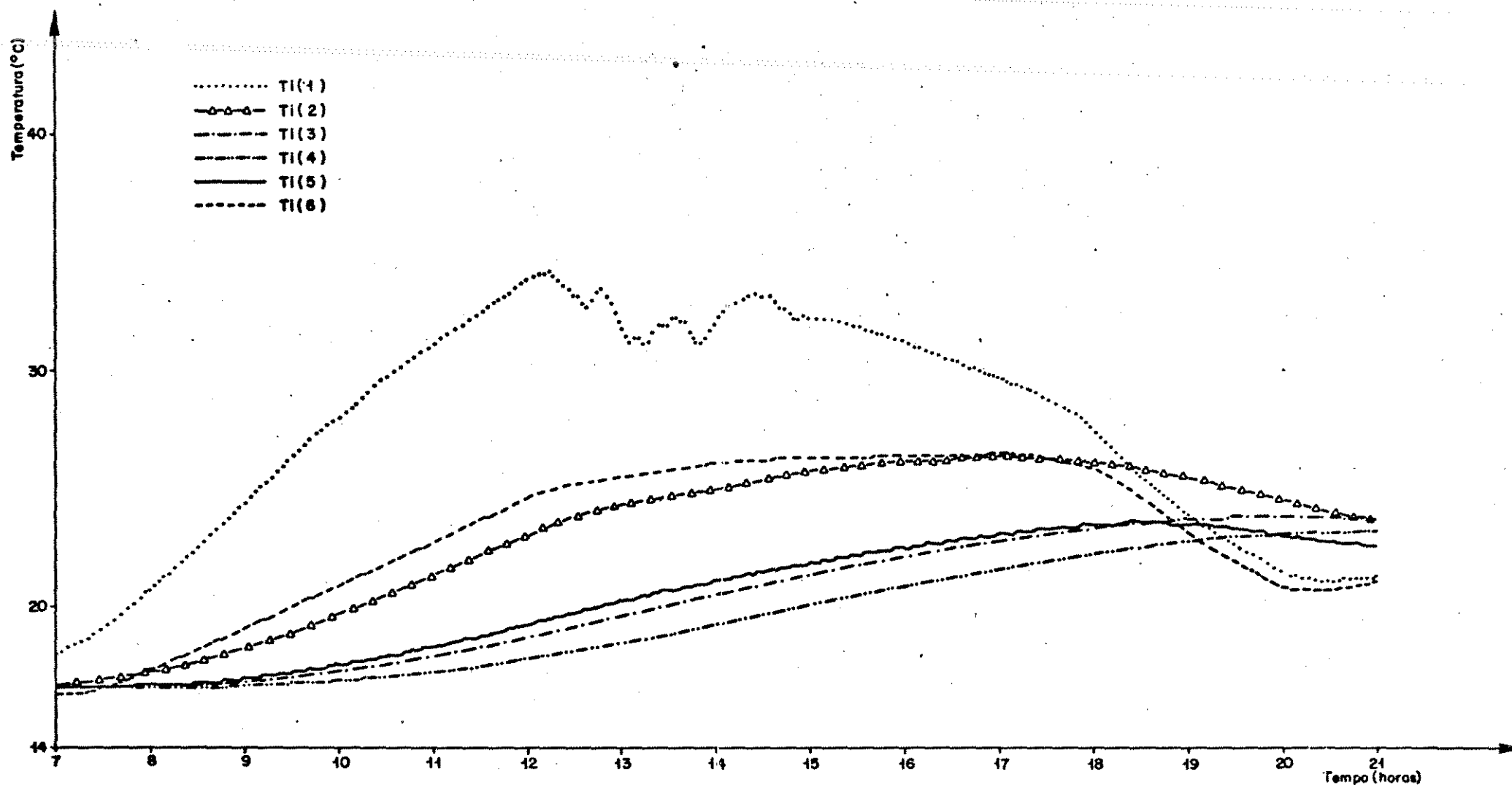


Figura 19. Temperaturas das diferentes camadas elementares do isolante pedra, espessura (15 cm), $T_i(1)$, $T_i(2)$, $T_i(3)$, $T_i(4)$, $T_i(5)$ e $T_i(6)$, em regime transitório, (Modelo I), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$, em função do tempo.

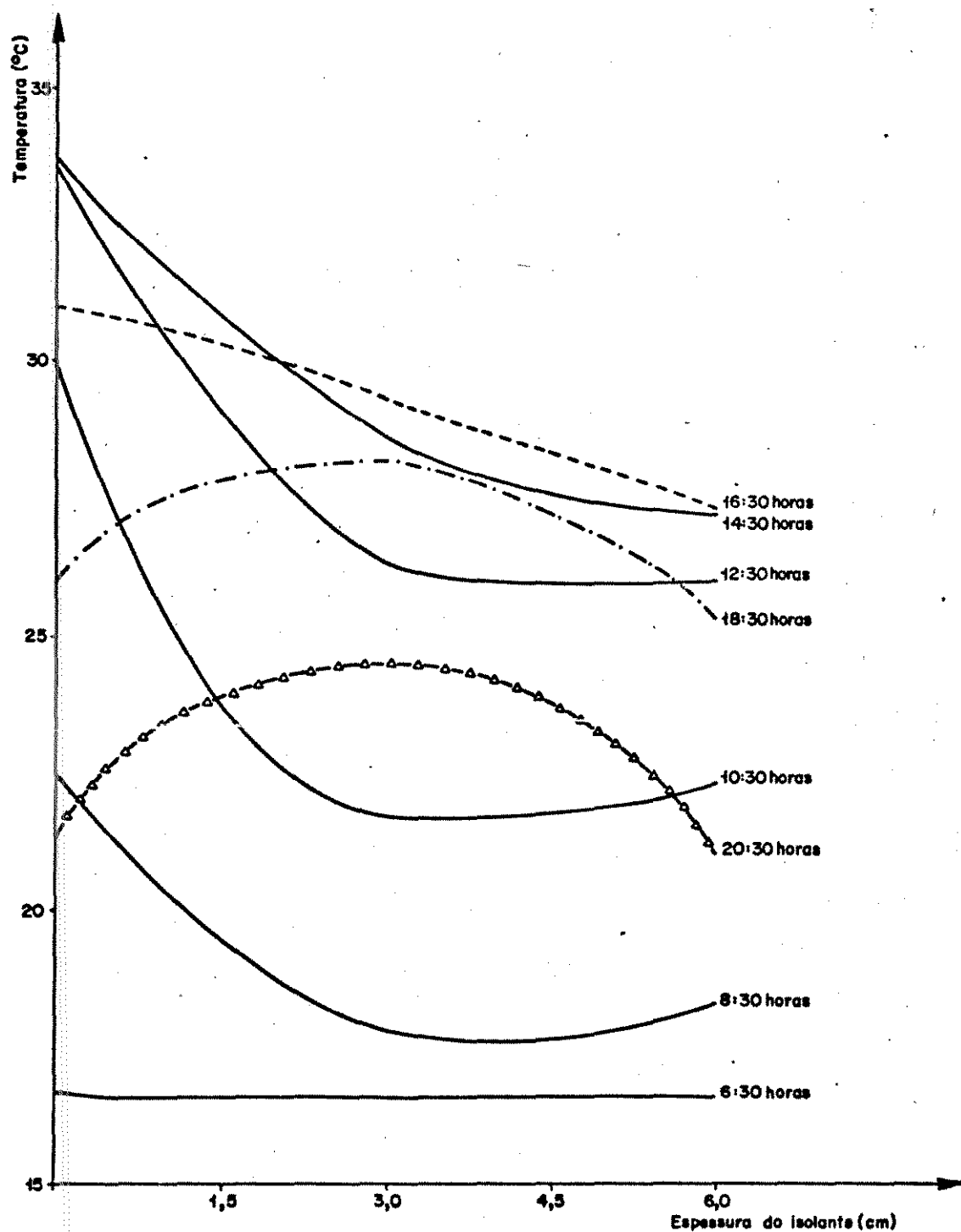


Figura 20. Temperatura do isolante pedras em função da espessura (total 6 cm) e do tempo em regime transitório (Modelo I).

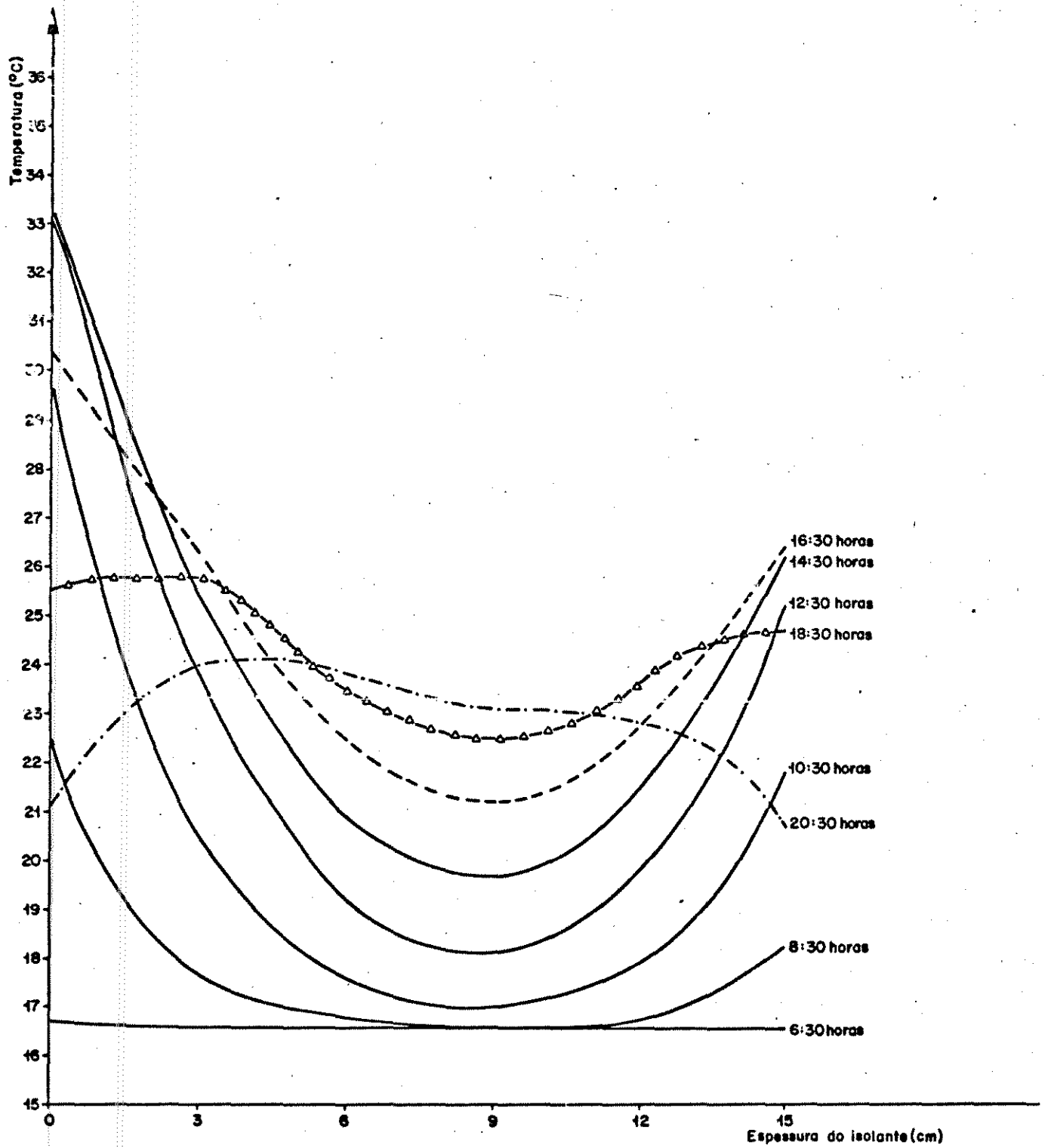


Figura 21. Temperaturas do isolante pedras em função da espessura (total = 15 cm) e do tempo. Regime transitório. (Modelo I).

que pela manhã ocorre armazenamento de calor no isolante, sendo pequena a diferença entre as temperaturas das camadas intermediária e inferior.

À tarde, ocorre um aumento da temperatura da camada intermediária com relação à inferior, para, a partir do pôr do sol, a temperatura da camada intermediária tornar-se maior que as temperaturas das camadas externas, fornecendo-lhes calor.

Pelas Figuras 19 e 21 para o isolante de 15 cm, observa-se que durante o dia, até cerca de 20 horas, as temperaturas das camadas intermediárias do isolante são sempre inferiores às das camadas externas.

Assim, contrariamente à espessura de 6 cm, parte do calor armazenado pela camada superior é perdido por transferência às camadas intermediárias, o que indica que a espessura foi superdimensionada.

A Tabela I mostra os rendimentos e o calor armazenado do coletor solar, nos casos dos modelos I, II e III, com vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$ e área do coletor de 60 m^2 .

Pode-se verificar pelo modelo I em regime transitório que o rendimento solar diário ($\eta_{s,d} = 0,312$) com espessura de pedras de 15 cm é menor do que com a espessura de 6 cm ($\eta_{s,d} = 0,325$).

O calor armazenado ($\text{ARM} = 3857 \text{ kw}$) com pedras de espessura de 15 cm é maior do que aquele com espessura de 6 cm ($\text{ARM} = 2325 \text{ kw}$), porém, a porção de energia armazenada disponível para o uso, no primeiro caso ($\eta_{\text{arm}} = 0,105$) é menor do que no segundo caso ($\eta_{\text{arm}} = 0,209$), devido ao superdimensionamento da espessura do isolante, como já foi verificado anteriormente.

Consequentemente, o seu rendimento útil diário ($\eta_{u,d} = 0,320$)

	Pedra ($\ell = 6\text{cm}$)		Pedra ($\ell = 15\text{cm}$)		Lã de vidro ($\ell = 6\text{cm}$)	
	Trans.	Perm.	Trans.	Perm.	Trans.	Perm.
<u>Modelo I</u>						
$\eta_{s,d}$	0,325	0,347	0,312	0,355	0,353	0,355
$\eta_{u,d}$	0,335	-	0,320	-	0,354	-
ARM (kw)	2325	-	3857	-	158	-
η_{arm}	0,209	-	0,105	-	0,248	-
<u>Modelo II</u>						
$\eta_{s,d}$	-	0,352	-	-	0,358	0,360
$\eta_{u,d}$	-	-	-	-	0,358	-
ARM(kw)	-	-	-	-	58	-
η_{arm}	-	-	-	-	0,145	-
<u>Modelo III</u>						
$\eta_{s,d}$	-	0,347	-	-	0,354	0,355
$\eta_{u,d}$	-	-	-	-	0,354	-
ARM(kw)	-	-	-	-	97	-
η_{arm}	-	-	-	-	0,142	-

TABELA I - Rendimentos e calor armazenado no coletor solar com área de 60 m^2 , no caso dos modelos I, II e III, com vazão do ar de $100\text{ m}^3/\text{min}$,

fica ainda mais baixo do que no caso da espessura menor ($\eta_{u,d}=0,335$).

Com lã de vidro como isolante, a diferença dos rendimentos solares diários entre os regimes transitório, 0,353, e permanente, 0,355, é desprezível, entretanto com pedras ela é importante, isto é, 0,325 para o regime transitório e 0,347 para o regime permanente.

Verifica-se também que o calor armazenado (2325 kw) com pedras de espessura de 6 cm é maior do que com a lã de vidro (158 kw) e, portanto, o calor disponível para o uso é maior. Entretanto, o $\eta_{s,d}$ (0,325) da pedra é menor do que da lã de vidro (0,353), o mesmo acontecendo com o $\eta_{u,d}$ (0,335) que é menor que o da lã de vidro (0,354).

Este fato, somado ao efeito da igualdade de oscilação entre a pedra e a lã de vidro, além de que a secagem do produto durante o dia é mais eficiente, leva à conclusão que o uso de pedra como isolante não apresenta vantagens consideráveis neste tipo de coletor.

A Figura 22 mostra a curva de temperatura de saída do ar em função do tempo para o modelo I, em regime transitório, com vazão do ar de 6 m³/min, área do coletor de 60 m², e tendo lã de vidro como isolante.

Comparando as temperaturas de saída da Fig. 22 com as das Figs. 23 e 12, cujas vazões do ar são de 20 m³/min, e 100 m³/min., respectivamente, e mesmas condições da Fig. 22, verificou-se que quanto menor a vazão do ar de entrada no coletor, mais altas são as temperaturas de saída do ar, como também as suas oscilações.

As Figuras 24 e 25 mostram as temperaturas de saída do ar em função do tempo para o modelo I, com área do coletor de 20 m² e vazões do ar de 20 e 6 m³/min, respectivamente.

Comparando-se as Figuras 23 e 24 com as mesmas vazões de

20 m³/min. e áreas do coletor de 60 m² e 20m², respectivamente, verificou-se que as temperaturas de saída do ar da Fig.23 são maiores que as das Figuras 24. Do mesmo modo, comparando-se as Figuras 22 e 25 com vazões do ar de 6 m³/min e áreas do coletor de 60 m² e 20 m², respectivamente, as temperaturas de saída do coletor da Figura 22 apresentam-se mais altas que as da Fig. 25.

Portanto, conclui-se que quanto maior a área do coletor , para a mesma vazão, maior será a temperatura do ar de saída e as oscilações das temperaturas.

vazão (m ³ /min)	20		6		100
área do coletor (m ²)	20	60	20	60	60
ARM(kw)	56	172	54	167	158
η _{s,d}	0,094	0,053	0,209	0,135	0,353
η _{arm}	0,080	0,149	0,162	0,110	0,248
η _{u,d}	0,095	0,054	0,209	0,135	0,356

TABELA II - Rendimentos e calor armazenado em regime transitório no coletor solar com áreas de 20 e 60 m², para o modelo I, com vazões do ar de 6,20 e 100 m³/min.

A Tabela II mostra os rendimentos diários e calor armazenado do coletor em regime transitório, para o modelo I, tendo como isolante lã de vidro, para diferentes vazões de ar e áreas do coletor.

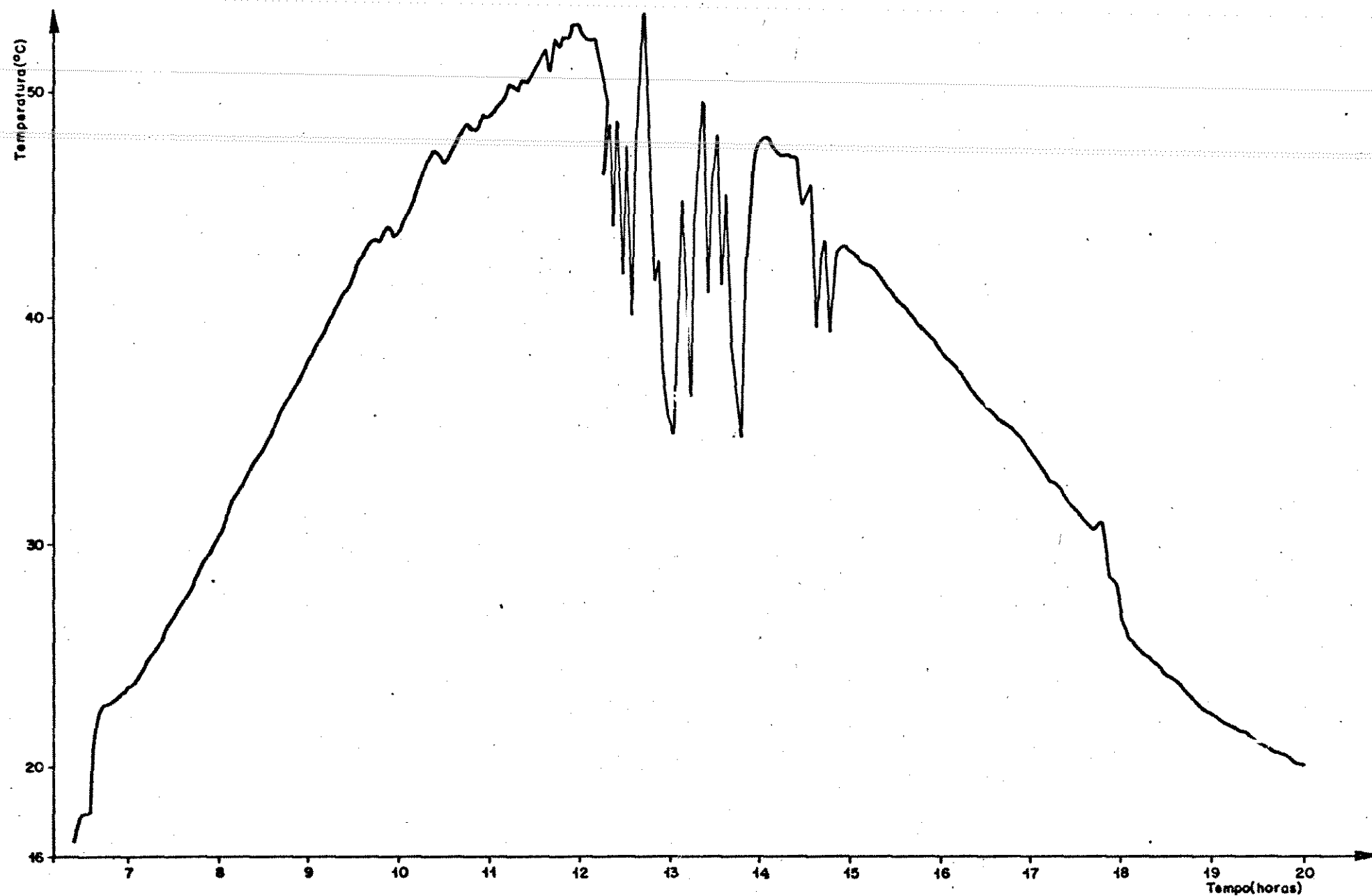


Figura 22. Temperatura de saída do coletor solar (T_s), em regime transitório, isolante lã de vidro, (Modleio I), vazão do ar de $6 \text{ m}^3/\text{min}$, área do coletor de 60 m^2 , em função do tempo.

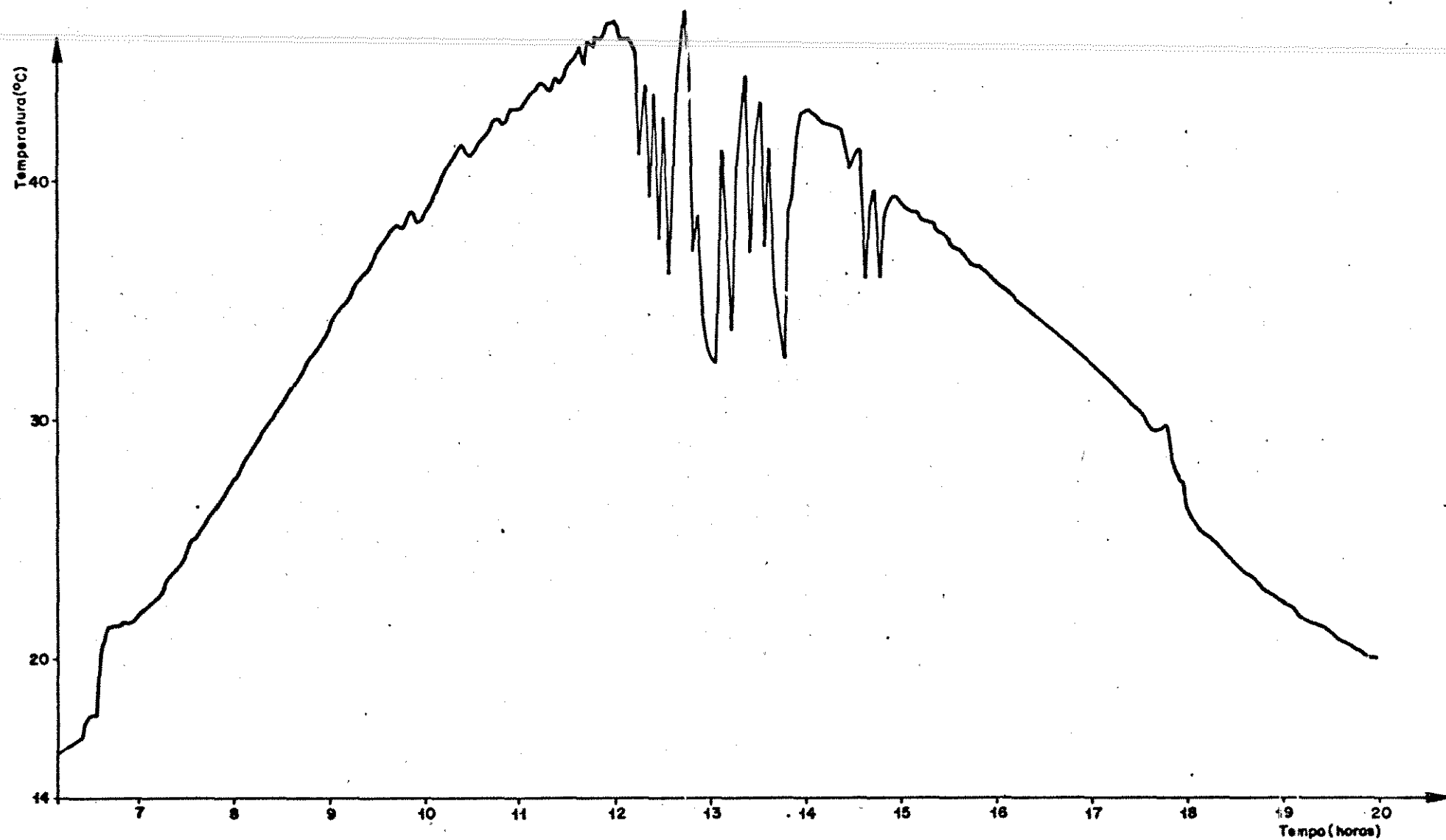


Figura 23. Temperaturas de saída do coletor solar (T_s), em regime transitório, isolante lã de vidro, (Modelo I), vazão de ar de $20 \text{ m}^3/\text{min}$, área do coletor de 60 m^2 , em função do tempo.

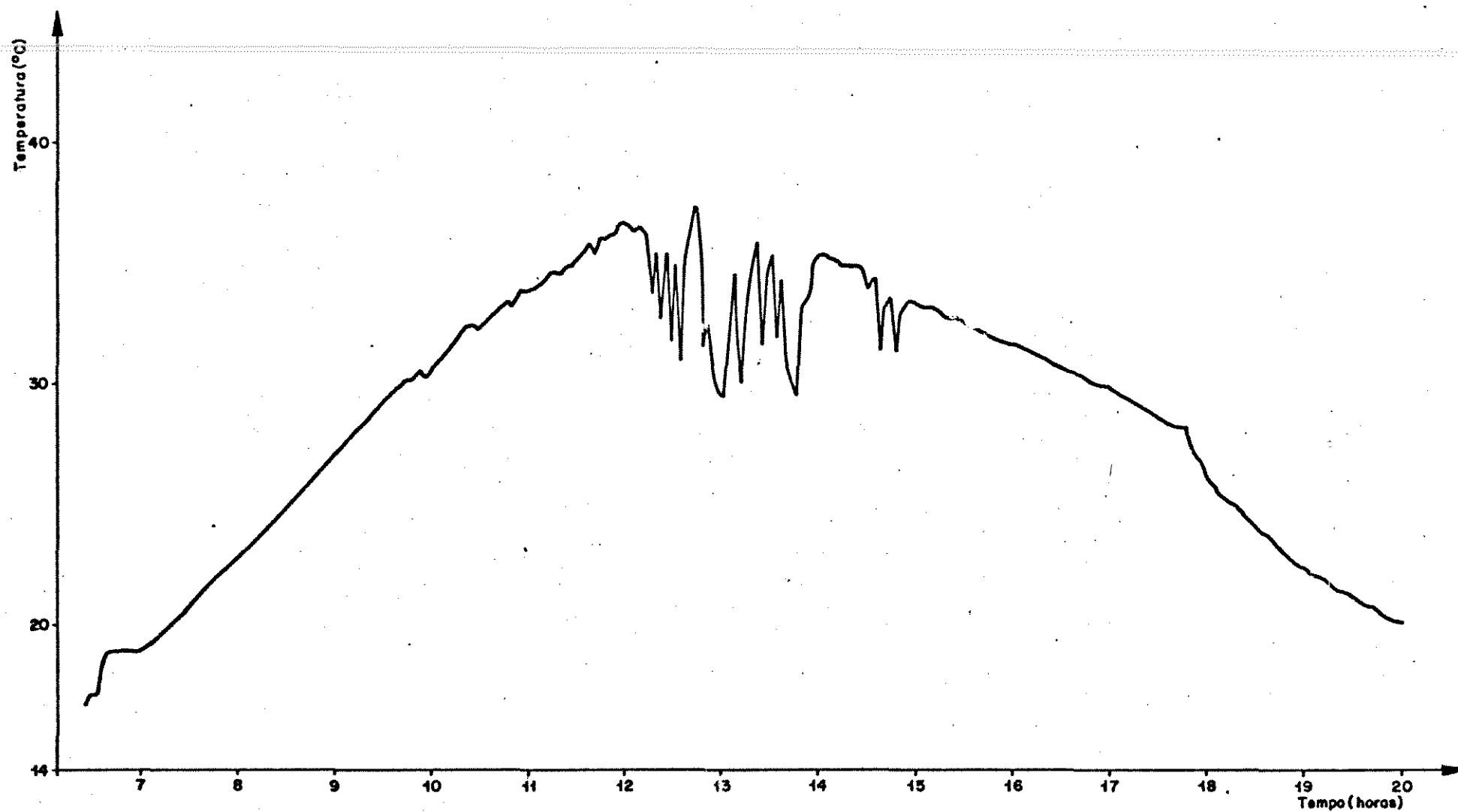


Figura 24. Temperatura de saída do coletor solar (T_s), em regime transitório, isolante lã de vidro, (Modelo I), vazão do ar de $20 \text{ m}^3/\text{min}$, área do coletor de 20 m^2 , em função do tempo.

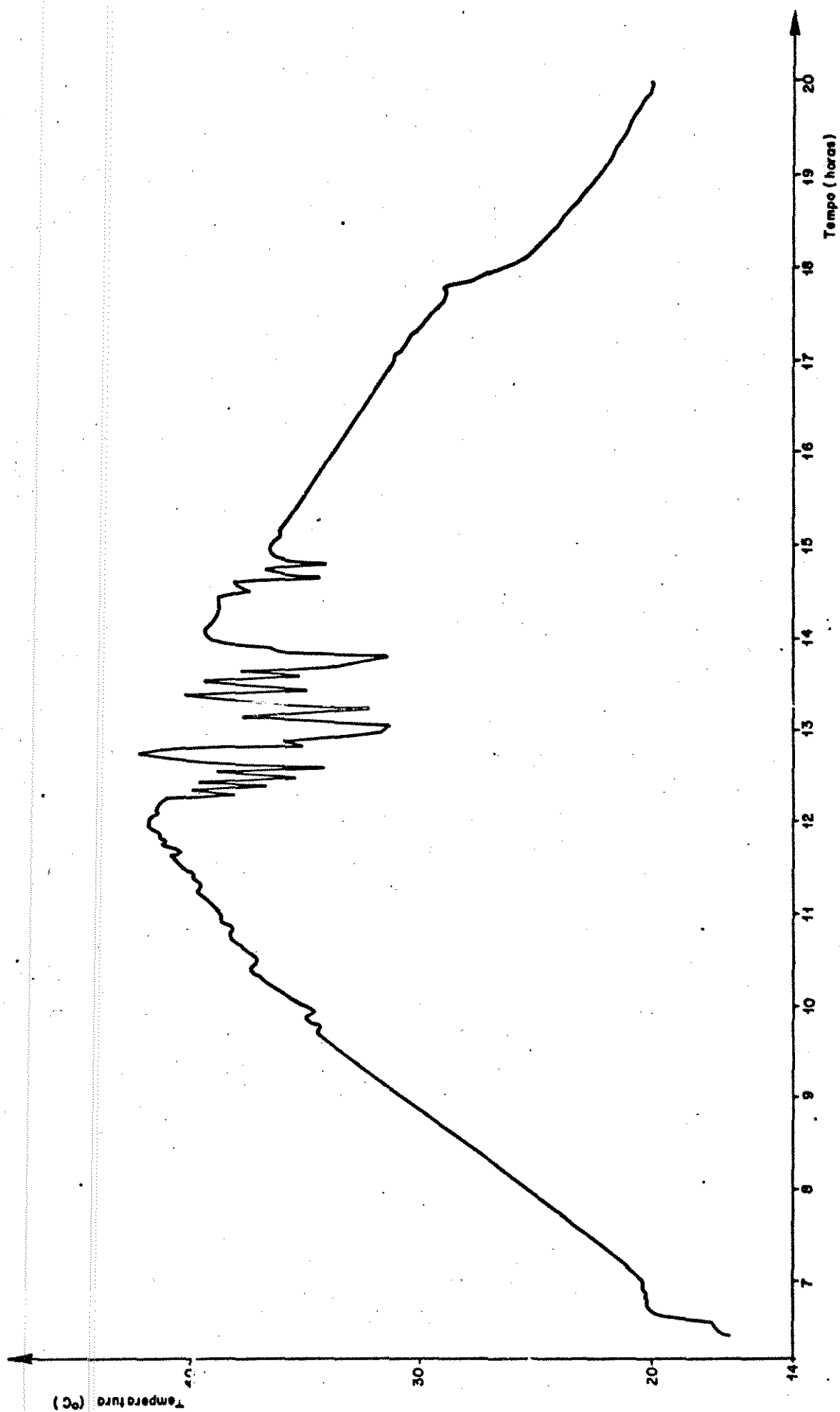


Figura 25. Temperatura de saída do coletor solar (T_s), em regime transitório, isolante lã de vidro, (Modelo I), vazão do ar de $6 \text{ m}^3/\text{min}$, área do coletor de 20 m^2 , em função do tempo.

Pode-se observar que o rendimento solar diário (η_{sd}) e o rendimento útil diário (η_{ud}) são menores quanto menor a vazão do ar.

As temperaturas do ar na saída do coletor solar aumentam com a diminuição das vazões do ar de entrada, como já foi demonstrado anteriormente. Mas os rendimentos do coletor diminuem com o decrêscimo das vazões.

6.2 . Resultados da simulação matemática de secagem:

As Figuras 26 e 27 mostram o teor de umidade do milho em função do tempo, para diferentes camadas, na quantidade de 3 ton.de produto em regime transitório, tendo como isolante pedras e lã de vidro, respectivamente.

Nestas simulações foram utilizadas as temperaturas e razões de mistura do ar, na saída do coletor solar, com vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$, área do coletor de 60 m^2 e para o modelo climatológico 1.

O tempo de secagem total obtido com o isolante pedras foi de 12,45 hs. e para a lã de vidro 12,10 horas.

Conclui-se portanto ser muito pequena a diferença entre os isolantes pedras e lã de vidro, para este tipo de coletor solar, apesar das diferenças de capacidade térmica existentes.

Comparando-se as curvas de secagem para 3 ton. de produto em regimes permanente e transitório, (Figuras 28 e 26, respectivamente) para o modelo 1, isolante pedra, verificou-se que o tempo de secagem para o regime transitório foi de 12,45 horas e para o regime permanente 12,2 horas. Portanto, para este tipo de coletor solar as diferenças entre os regimes transitório e permanente são muito pequenas, podendo-se considerar apenas um tipo de regime para a avaliação do coletor.

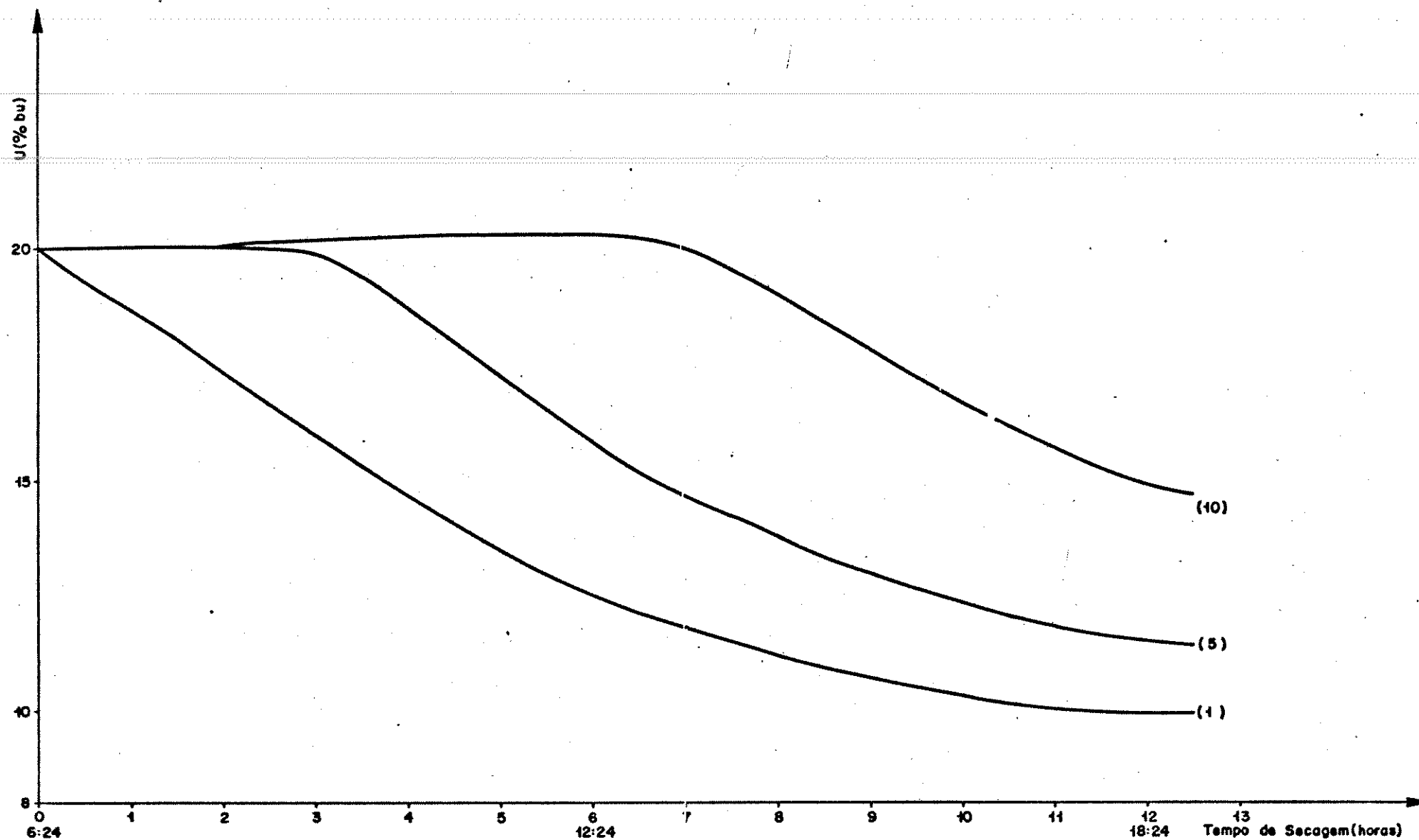


Figura 26. Teor de umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 3 toneladas, em regime transitório, pedra como isolante, (Modelo I); vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$.

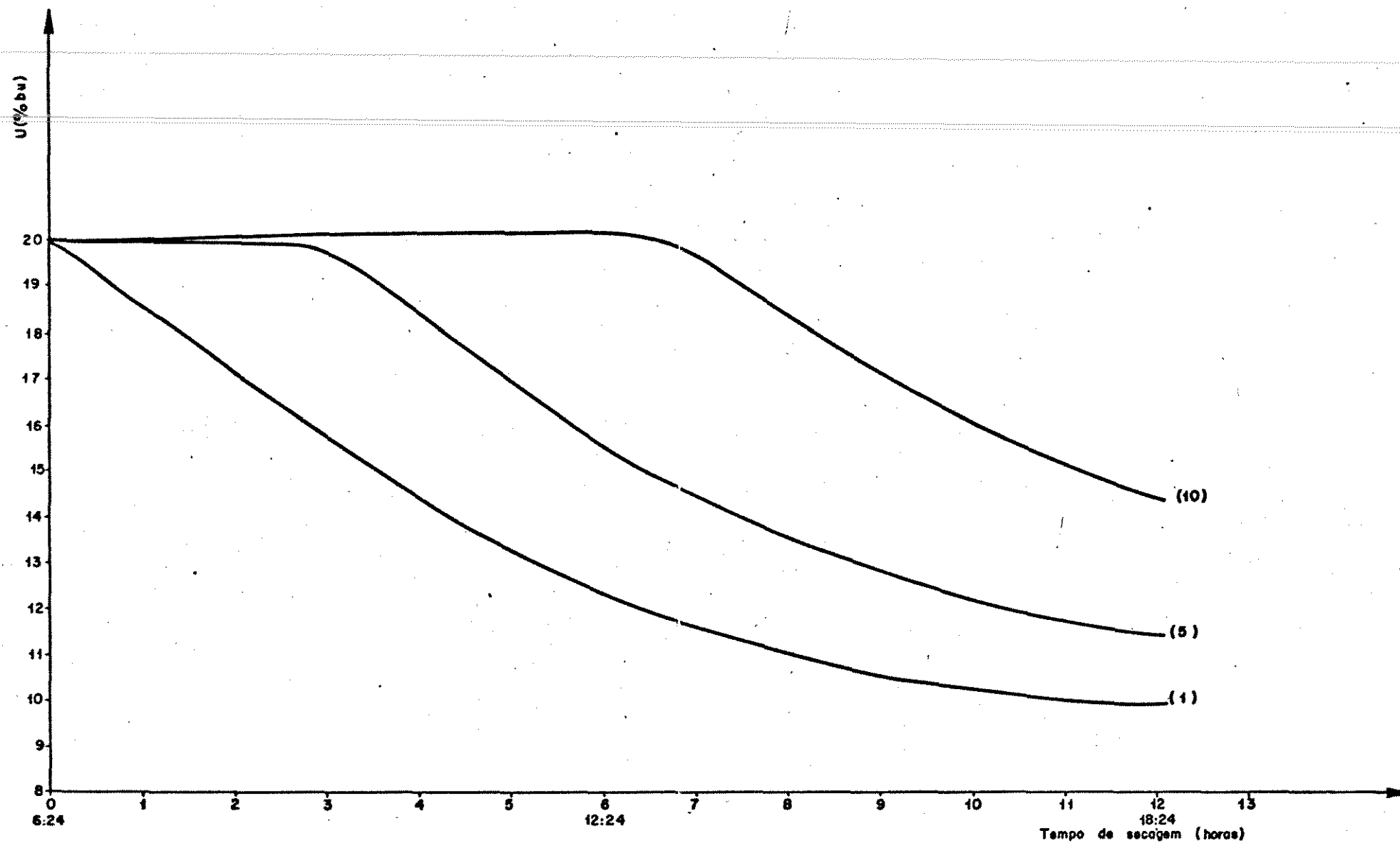


Figura 27. Teor de umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 3 toneladas, regime transitório, lâ de vidro como isolante, (Modelo I), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$.

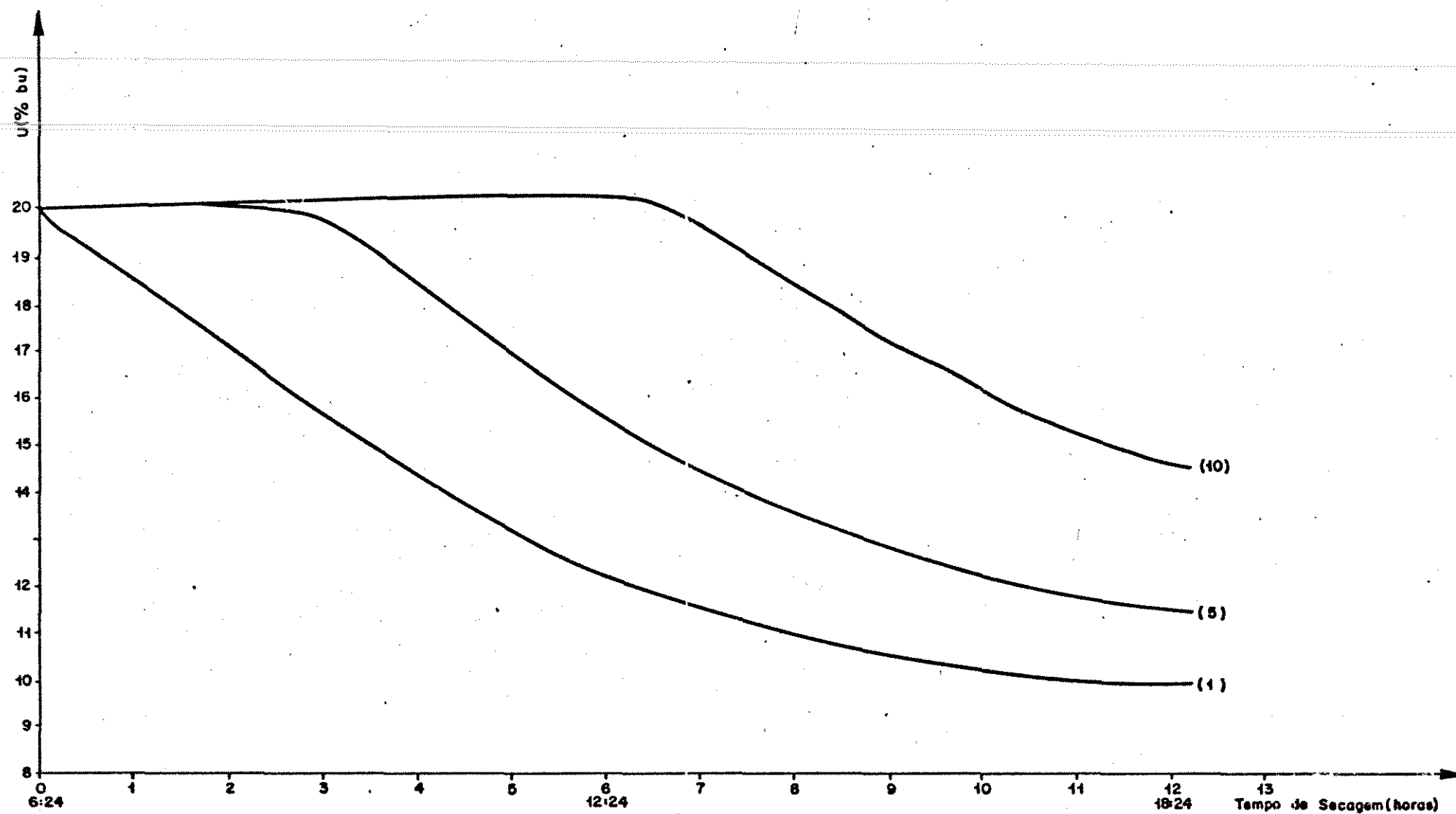


Figura 28. Teor da umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 3 toneladas, regime permanente, pedra como isolante, (Modelo 1), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$.

Neste tipo de coletor solar, é a placa absorvente que recebe a energia solar e não o isolante. Assim, as temperaturas do isolante não são suficientemente altas. Por causa deste efeito as considerações sobre diferenças de capacidade térmica não parecem importar muito neste tipo de coletor.

No coletor solar cuja superfície absorvente está em contato ou incorporada ao isolante que é coberto por cobertura transparente a uma certa distância, as funções de capacidade térmica do isolante parecem ser importantes, pois suas temperaturas ficam bastante altas.

As Figuras 29 e 30 mostram o teor de umidade do milho em função do tempo, para 3 ton. de produto, em regime transitório, isolante lã de vidro, para os modelos II e III respectivamente.

Observa-se pela Figura 29 que a camada inferior seca durante o dia e se reumidifica à noite, até mais ou menos 8 hs. do dia seguinte, devido à alta umidade relativa do ar de secagem durante a noite.

A camada intermediária seca durante o dia, apresentando umidade constante à noite, e voltando a secar durante o 2º dia.

A camada superior sofre uma pequena reumidificação no início da secagem, para então ter sua umidade diminuída no final da secagem.

A Figura 30 para o modelo III e mesmas condições da Figura 29 (modelo II) nos mostra um processo de secagem semelhante a ela.

O tempo de secagem varia bastante conforme o modelo climatológico utilizado.

A Figura 31 mostra a curva de secagem de 10 ton. de milho,

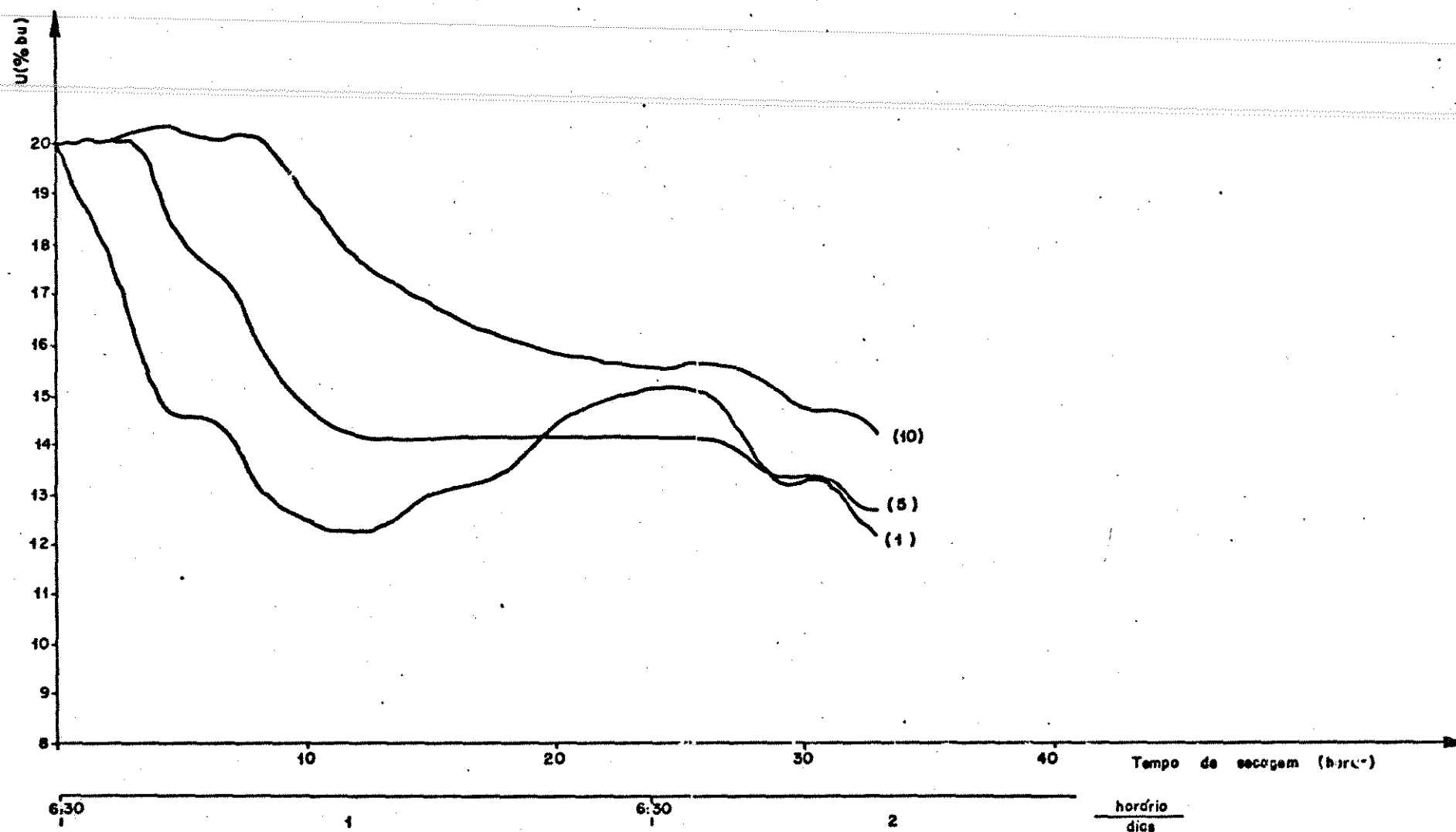


Figura 29. Teor da umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 3 toneladas, regime transitório, lâ de vidro como isolante, (Modelo II), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$.

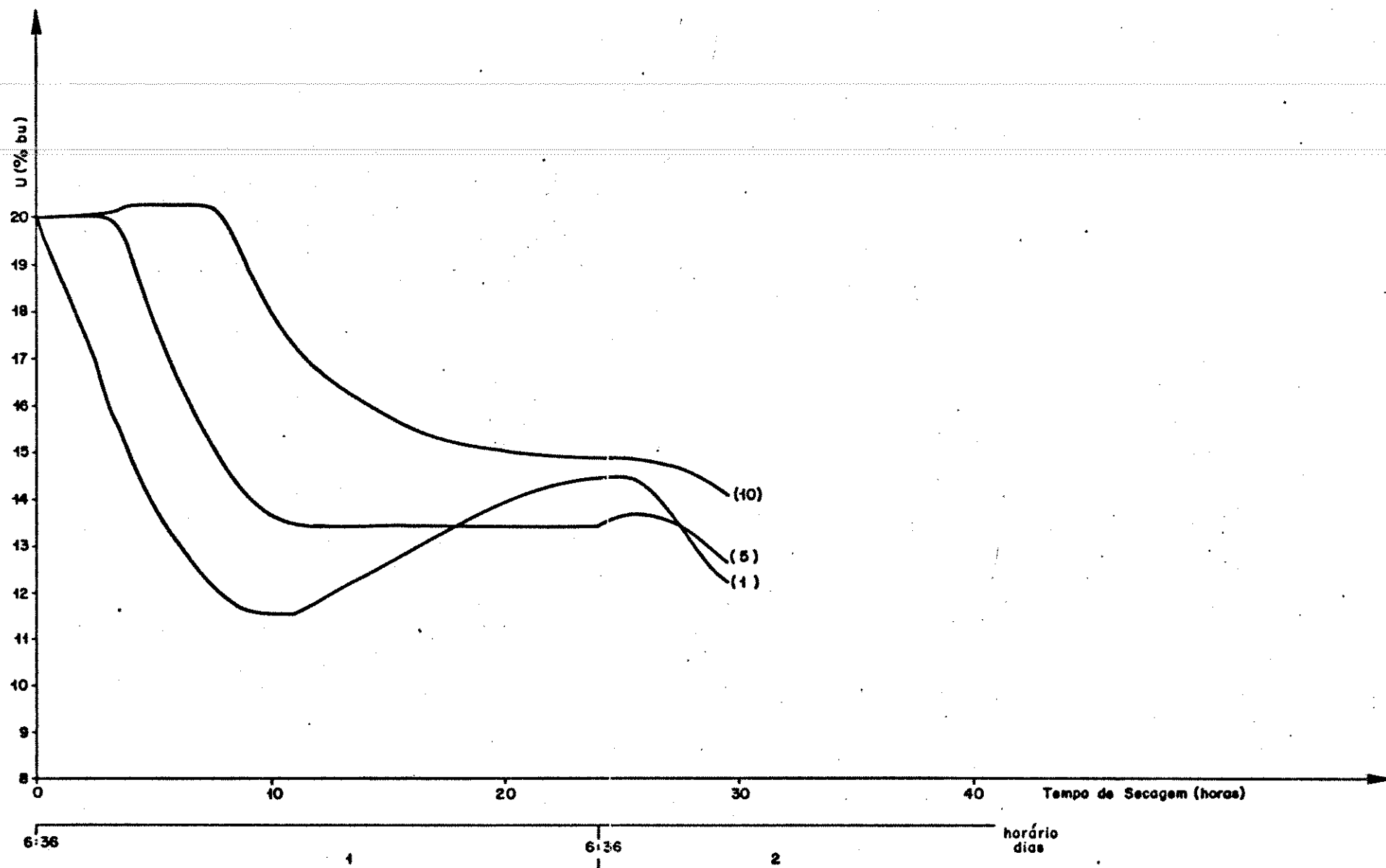


Figura 30. Teor da umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 3 toneladas, regime transitório, lã de vidro como isolante, (Modelo III), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$.

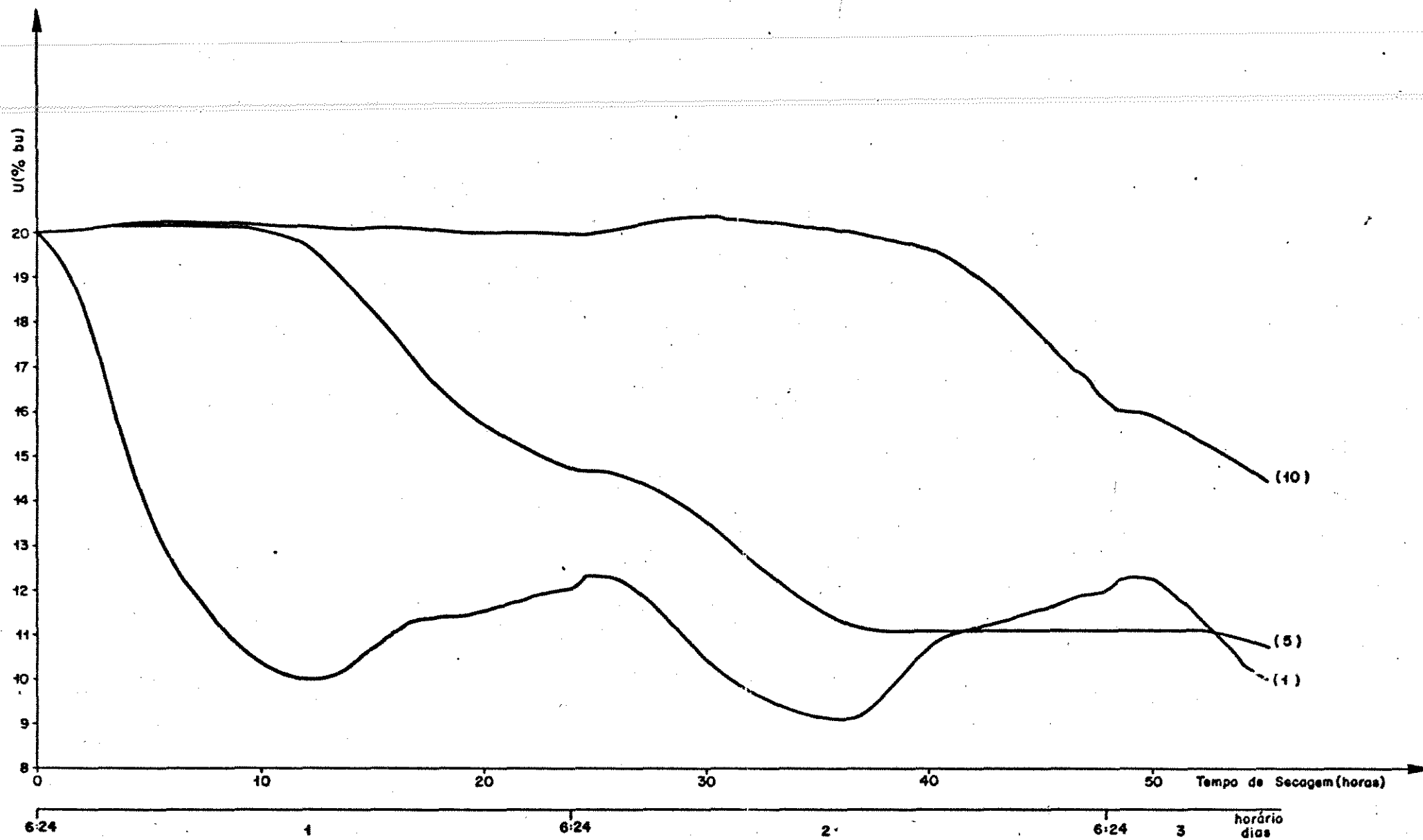


Figura 31. Teor da umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 10 toneladas, regime transitório, lã de vidro como isolante, (Modelo I), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$.

para o modelo I, em regime transitório, tendo como isolante lã de vidro.

Pode-se observar pela Figura 31 que no 1º dia a camada inferior de milho seca durante o dia e se reumidifica durante a noite até cerca de 8 horas do dia seguinte. Entretanto, a camada do meio umidifica-se durante o dia, secando muito durante a noite. Isto se explica pelo fato que, devido à reumidificação das camadas inferiores à noite, o ar que atinge a camada intermediária possui umidade reduzida.

No 2º dia, a camada inferior recomeça a secar durante o dia e reumidificar à noite, e assim o processo continua no 3º dia. Entretanto, a camada intermediária continua a secar durante o dia e se equilibra à noite em um valor de umidade mais baixo que o da camada inferior.

A camada superior se mantém com umidade relativamente constante durante dois dias e começa a secar apenas a partir da noite do 2º dia, apesar da reumidificação da camada inferior devido ao efeito já explicado anteriormente.

As Figuras 32 e 33 mostram a umidade em função do tempo de 10 ton. de milho e modelos climatológicos II e III.

A secagem das camadas inferior, intermediária e superior procedeu como a do modelo I, entretanto o tempo de secagem para o modelo II foi de 75.2 h. e modelo III de 72.5 h, tempo maior que o conseguido com o modelo I que foi de 55,3 h.

Assim como para 3 ton., o modelo I mostrou-se mais eficiente na secagem que os modelos II e III devido à intensidade de radiação solar presente nesse dia.

A secagem de 50 ton. de produtos com vazão do ar de $100\text{m}^3/\text{min.}$ e área do coletor de 60m^2 para o modelo I está na Figura 34.

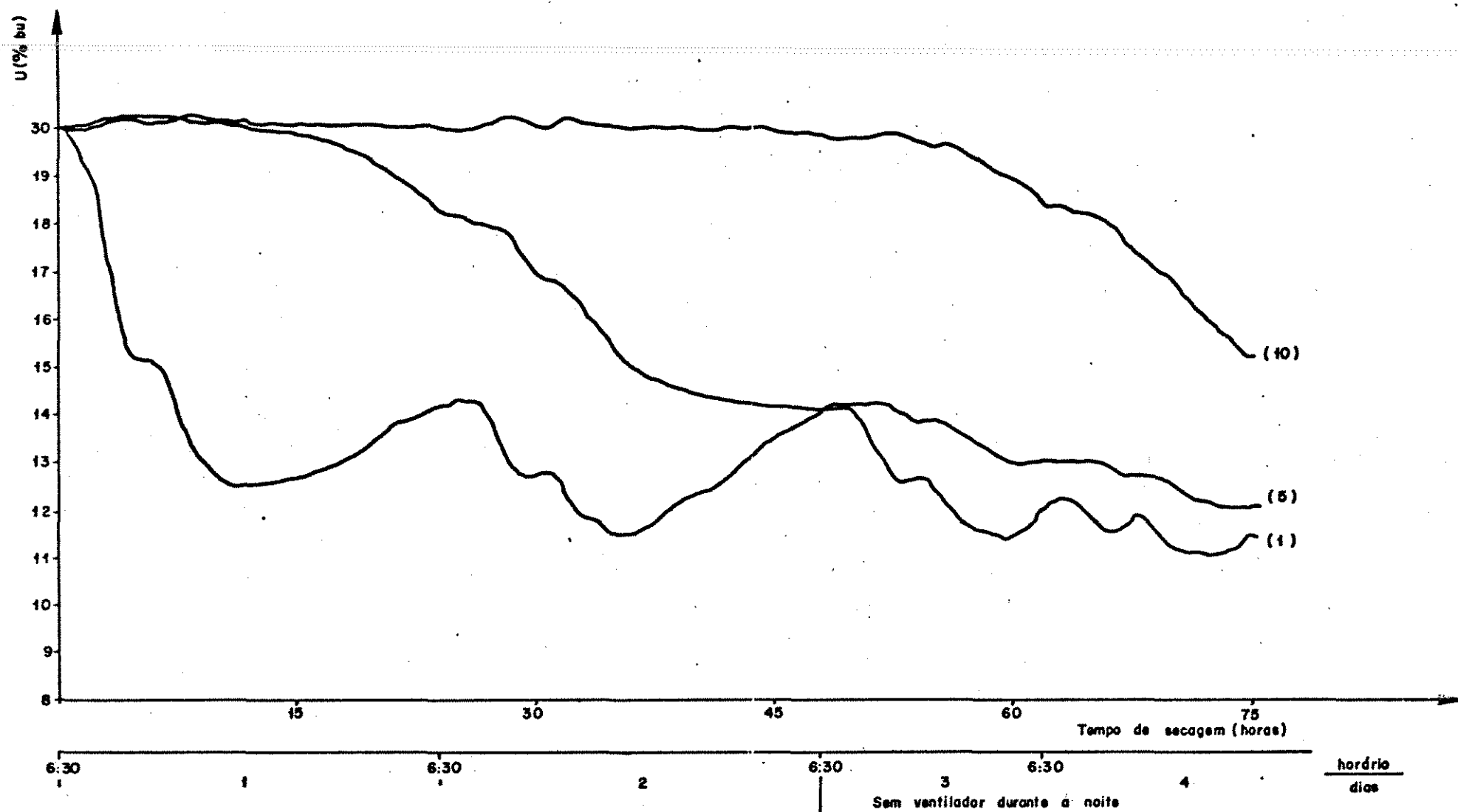


Figura 32. Teor da umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 10 toneladas, regime transitório, lã de vidro como isolante, (Modelo II), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$.

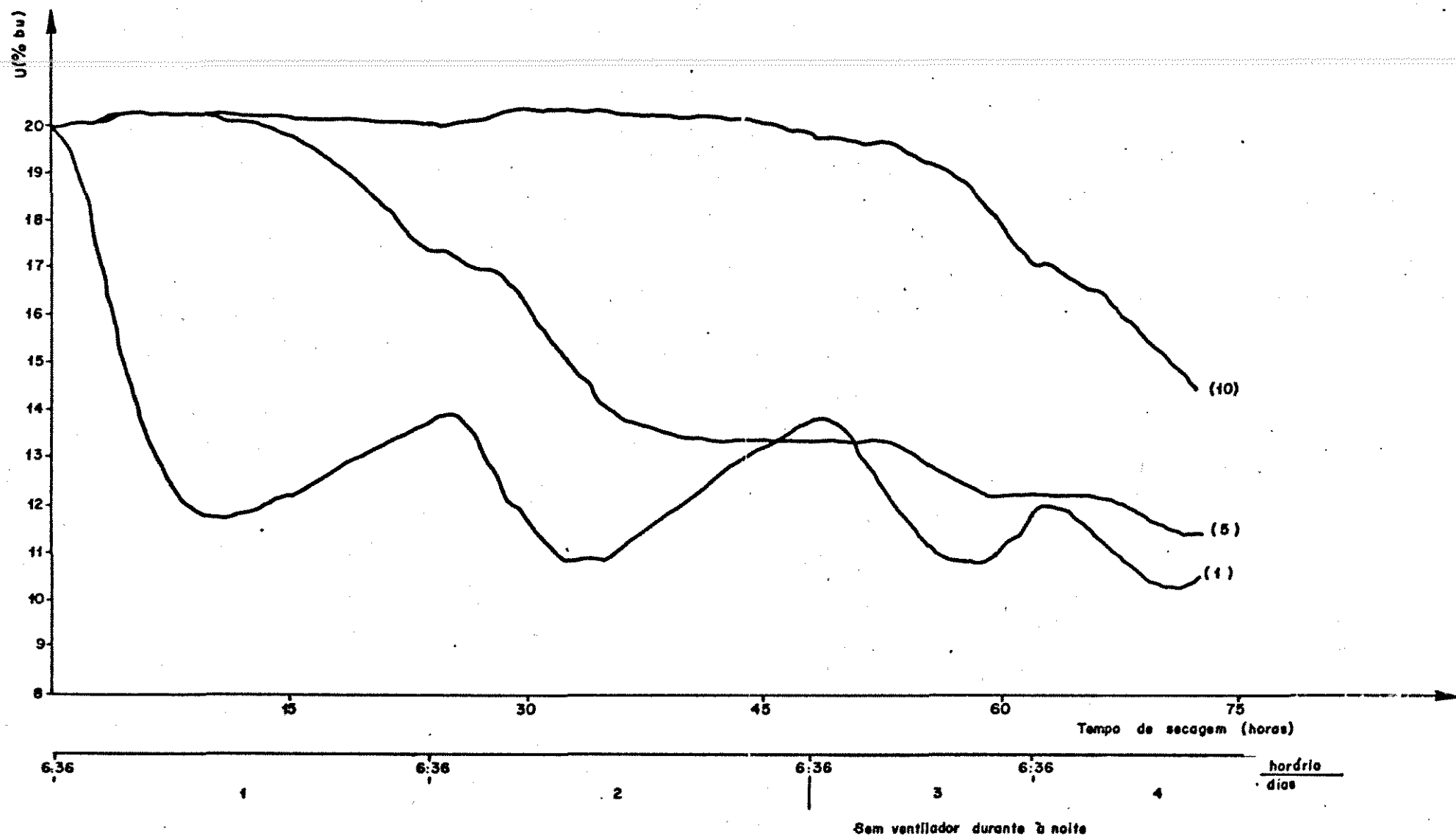


Figura 33. Teor da umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 10 toneladas, regime transitório, lã de vidro como isolante, (Modelo III), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$.

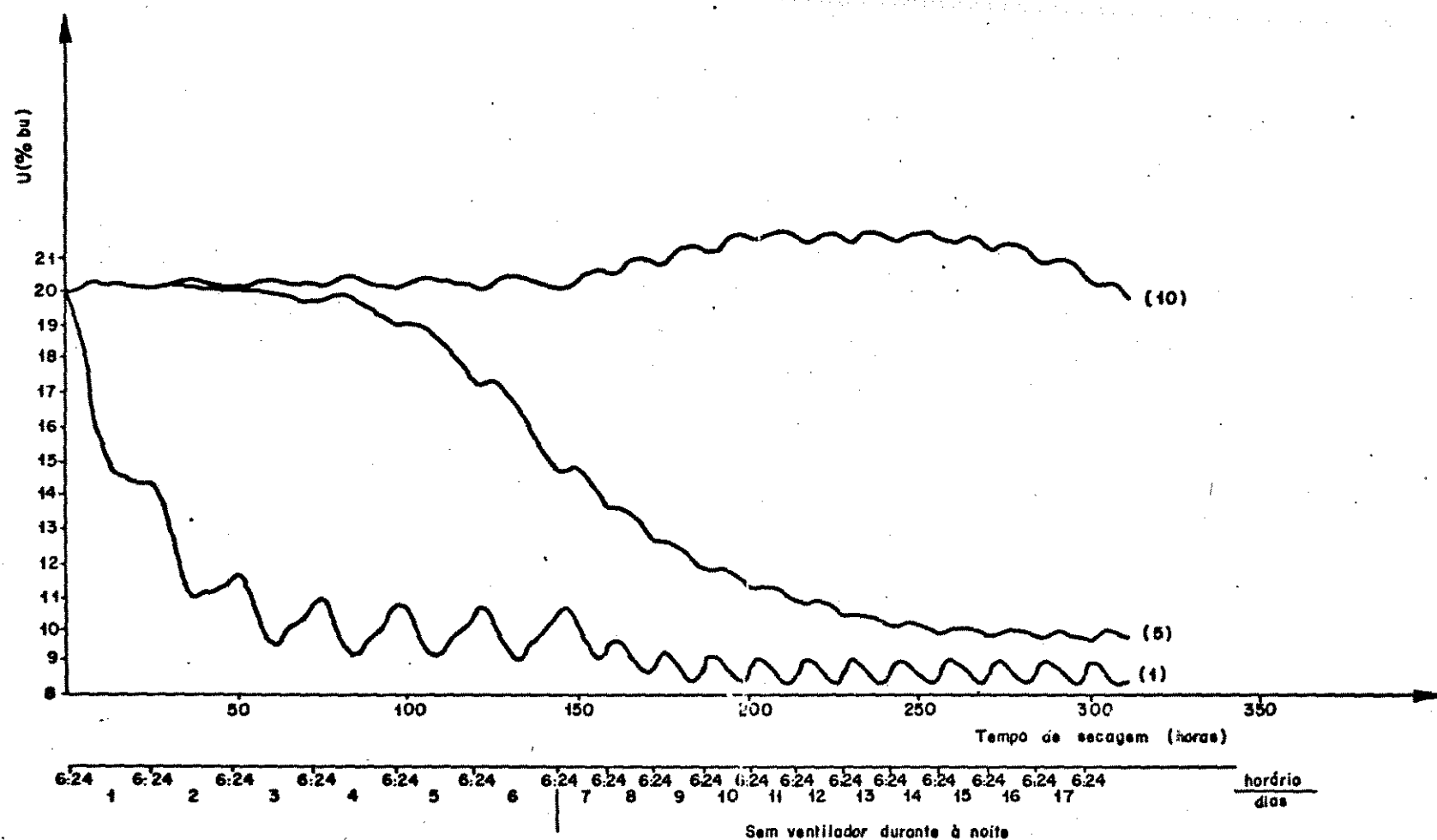


Figura 34. Teor de umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 50 toneladas, regime transitório, lã de vidro como isolante (Modelo I), vazão do ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$.

Esta secagem mostrou-se inviável, pois após 312 horas, quando a umidade da camada superior ainda era 19,7%, com umidade média de 11,40%, a deterioração acumulada atingia valor acima de 0,5%, que é o valor limite de deterioração na fase de secagem.

Enquanto a camada superior apresentava alto teor de umidade, as camadas intermediária e inferior sofriam processo de supersecagem.

Conclui-se, portanto, ser a vazão de $2 \text{ m}^3/\text{min}/\text{t}$ muito baixa para a secagem de 50 t. de produto, causando deterioração do mesmo.

A secagem de 50 t de milho com a vazão de $150 \text{ m}^3/\text{min}$ para o modelo I está mostrada na Fig. 35. A secagem do produto foi conseguida após 220,6 horas, tendo valor de deterioração abaixo do limite.

Verifica-se, pois, que a vazão de $3 \text{ m}^3/\text{min}/\text{t}$ mostrou ser um valor aceitável, podendo ser considerada a vazão mínima para a secagem de 50 t de produto.

Vazão mínima é a menor vazão que pode ser utilizada para a secagem, proporcionando a maior economia possível de consumo de potência do ventilador, sem que haja deterioração do produto.

A Tabela III mostra as unidades-tempo de secagem e deterioração máxima para as figuras acima citadas.

As Figuras 36 e 37 apresentam as curvas de secagem para 10 t de milho, vazão de $20 \text{ m}^3/\text{min}$ com $2 \text{ m}^3/\text{min}/\text{t}$, e áreas do coletor de 20 e 60 m^2 respectivamente.

Observa-se por tais figuras que, enquanto a camada superior apresentava alto teor de umidade, a deterioração acumulada já atingia valores superiores a 0,5%, tanto para a área do coletor de

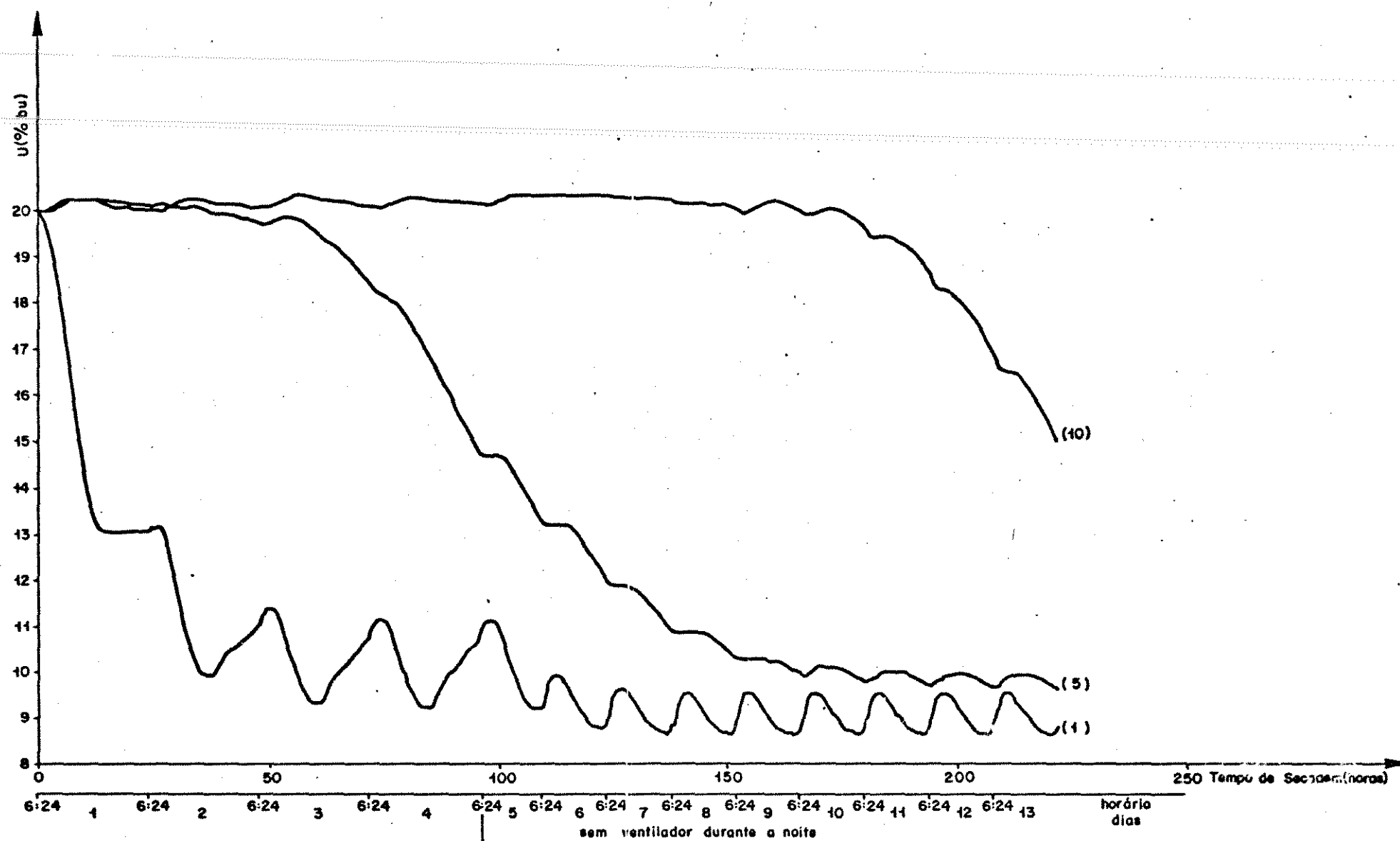


Figura 35. Teor da umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 50 toneladas, regime transitório, lã de vidro como isolante, (Modelo I), vazão do ar de $150 \text{ m}^3/\text{min}$.

Toneladas	3				
vazão do ar (m ³ /min)	100				
modelo	I		II	III	
regime	trans.		perm.	trans.	trans.
isolante	pedra	lã	pedra	lã	lã
Tempo de secagem t (dia)	1	1	1	2	2
t (horas)	12,45	12,10	12,20	32,55	29,50
Teor de umidade média (% b.u)	11,92	11,87	11,90	12,98	12,99
Teor de umidade máxima (% b.u)	14,49	14,49	14,49	14,18	14,11
Teor de umidade mínima (% b.u)	9,97	9,90	9,94	12,16	12,22
Deterioração máxima (%)	0,0088	0,0087	0,0087	0,0114	0,0128

Regime	transitório				
isolante	lã				
toneladas	10			50	
vazão de ar (m ³ /min)	100			100	150
modelo	I	II	III	I	I
Tempo de secagem t (dia)	3	4	4	18	13
t (horas)	55,25	75,15	72,50	312	222
Teor de umidade média (% b.u)	11,53	12,63	11,88	11,40	10,42
Teor de umidade máxima (% b.u)	14,49	15,25	14,50	13,76	15,02
Teor de umidade mínima (% b.u)	10,03	11,48	10,41	8,45	8,86
Deterioração máxima (%)	0,0383	0,0497	0,0613	0,5111	0,2367

TABELA III - Umidades, tempo de secagem e deterioração máxima para os modelos I, II, III nas quantidades de 3.10 e 50 toneladas de produto.

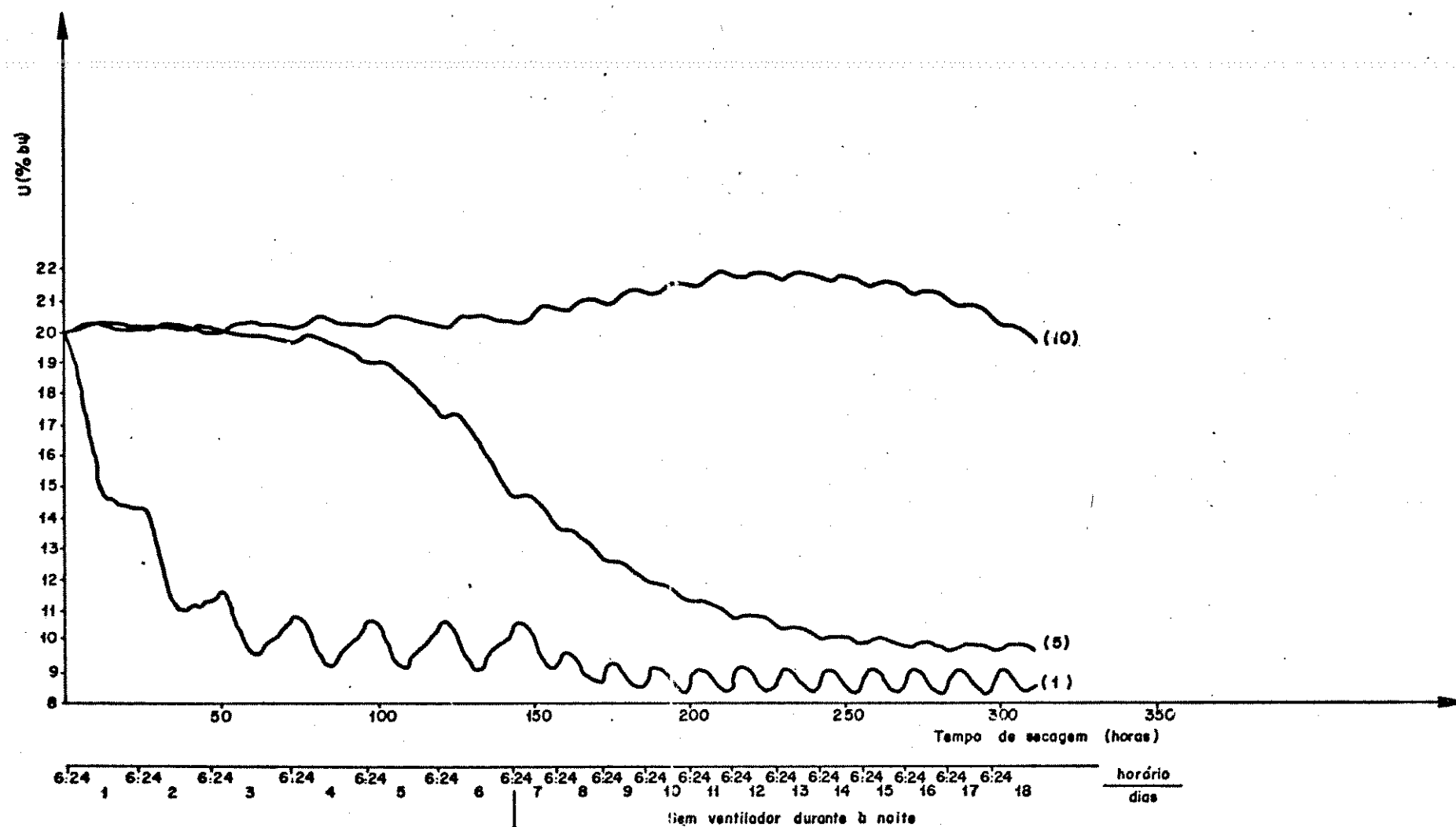


Figura 36. Teor de umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 10 toneladas, regime transitório, lã de vidro como isolante, (Modelo I), vazão do ar de $20 \text{ m}^3/\text{min}$, área do coletor de 20 m^2 .

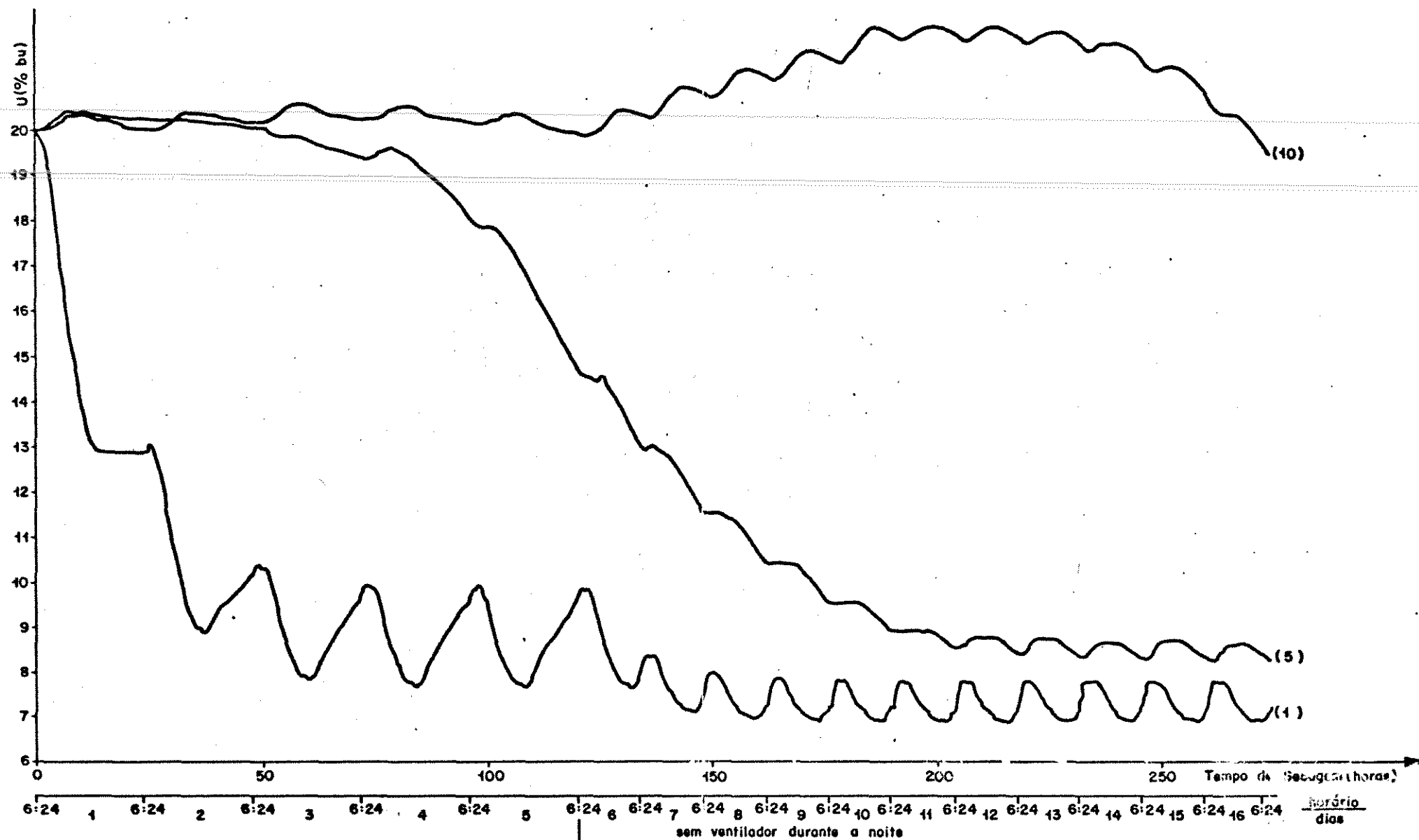


Figura 37. Teor de umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 10 toneladas, regime transitório, lã de vidro como isolante, (Modelo I), vazão do ar de $20 \text{ m}^3/\text{min}$, área do coletor de 60 m^2 .

20 m² quanto para a área de 60 m².

Portanto, verifica-se que a vazão de 2 m³/min/t é muito baixa para a secagem de 10 t de produto, mesmo para diferentes área de coletor.

As Figuras 38 e 39 dão o teor de umidade do milho em função do tempo para 3 t de produto, vazão de 6 m³/min com 2 m³/min/t para o modelo I e áreas do coletor de 20 e 60 m².

O tempo de secagem para a área do coletor de 20 m² foi de 330 horas, enquanto que para a área de 60 m² foi de 278 horas. A deterioração, em nenhum dos dois casos foi maior que o valor limite.

Conclui-se portanto ser viável a secagem de 3 t de produto com a vazão de 2 m³/min/t, o mesmo não ocorrendo para 50 t de produto. Assim, a vazão mínima deve ser determinada através da quantidade de produto que vai se secar, influenciando também a área do coletor e modelos climatológicos a serem utilizados.

As umidades, tempo de secagem e deteriorações máximas das figuras acima estão dadas na Tabela IV.

Estudo comparativo de secagem com ar natural e aquecedores artificiais

6.3. Estudo comparativo de secagem com ar natural e aquecedores artificiais:

É interessante estudar a secagem com coletor solar e com ar natural sob mesmas condições climatológicas para comparar dois sistemas de secagem, por exemplo o tempo de secagem e analisar as suas viabilidades.

A secagem com ar natural constitui o processo mais simples e que exige um investimento mínimo, pois não necessita

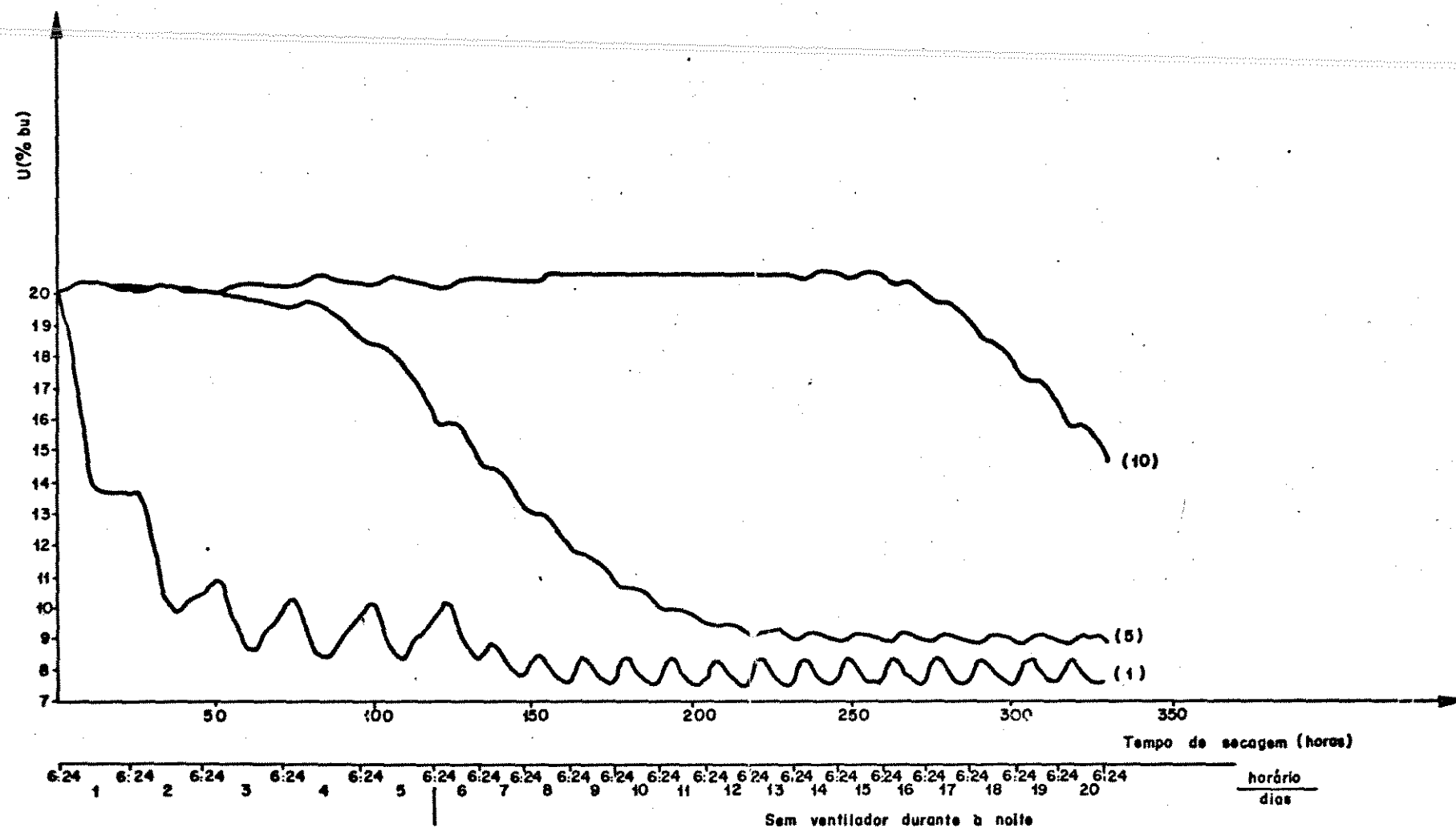


Figura 38. Teor de umidade do milho em função do tempo para diferentes camadas, no caso de 3 toneladas, regime transitório, lã de vidro como isolante, (Modelo I), vazão do ar de $20 \text{ m}^3/\text{min}$, área do coletor de 20 m^2 .

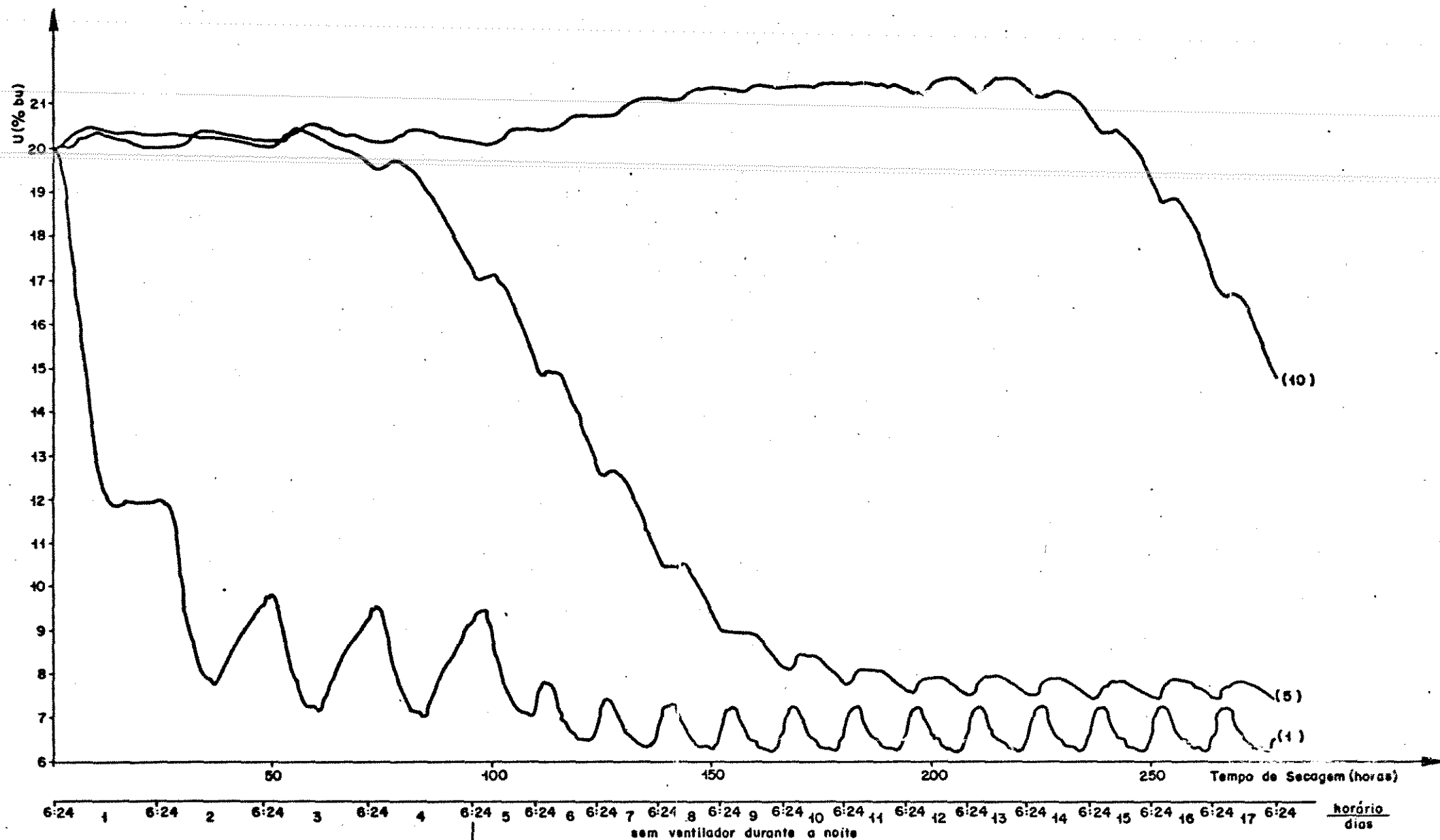


Figura 39. Teor de umidade do milho em função do tempo, para diferentes camadas, no caso 3 toneladas, regime transi-
tório, lã de vidro como isolante, (Modelo I), vazão do ar de $4 \text{ m}^3/\text{min}$, área do coletor de 60 m^2 .

Toneladas	10		3	
vazão de ar (m^3/min)	20		6	
área do coletor (m^2)	20	60	20	60
Tempo de secagem				
t (horas)	312	274	330	278
t (dias)	18	17	20	17
Teor de umidade média (% b.u)	11,42	9,97	9,71	8,42
Teor de umidade máxima (% b.u)	19,71	19,44	14,83	14,77
Teor de umidade mínima (% b.u)	8,48	7,22	7,76	6,65
Deterioração máxima (%)	0,52	0,51	0,46	0,49

TABELA IV - Umidades, tempo de secagem e deteriorações máximas para vazões do ar de 6 e $20\text{m}^3/\text{min}$, áreas do coletor de 20 e 60m^2 e quantidades de produto de 3 e 10 toneladas.

de fonte de aquecimento.

A secagem com aquecedor artificial (eletricidade, gás, etc.) por sua vez, permite uma diminuição do tempo de secagem, exigindo para isto um investimento maior.

Estudou-se a secagem com ar natural a fim de verificar o tempo necessário sob diferentes condições climatológicas.

A seguir, fez-se o estudo da secagem com aquecedor artificial, determinando o tempo de secagem, para diferentes valores de aumento de temperatura do ar. Estes valores foram comparados aos da secagem com ar natural.

Comparativamente aos dois processos de secagem descritos acima, foi também calculado o tempo de secagem utilizando-se um coletor solar.

SECAGEM COM AR NATURAL

O ar natural, movimentado pelo ventilador, sofre um aumento de temperatura de $1,5^{\circ}\text{C}$.

Simulou-se a secagem de 3 e 10 toneladas de milho no silo, com vazões de ar de 50 e $100\text{m}^3/\text{min}$. Usou-se os modelos I e II para os cálculos. A Tabela V mostra os resultados obtidos.

Para o modelo I consegue-se secar o produto até valores inferiores a 13% b.u (comercialmente aceito). Mas no caso do modelo II, após 91,5 h. a secagem do produto sofreu estabilização, não conseguindo diminuir seu teor para menos que 13,5% b.u.

Conclui-se, portanto, que a secagem com ar natural depende das condições climatológicas, havendo a possibilidade de ser insuficiente.

Modelo	I		II
Toneladas	3		3
vazão de ar (m^3/min)	50	100	100
Tempo de secagem			
t (dia)	2	2	4
t (horas)	38	31,5	73
Teor de umidade média (% b.u)	12,71	12,89	12,06
Teor de umidade máxima (% b.u)	15,46	13,89	14,45
Teor de umidade mínima (% b.u)	11,05	12,23	10,74
			13,39

TABELA V - Umidades e tempo de secagem obtidos para os modelos I e II, para vazões de ar de 50 e $100m^3/min$ e quantidades de produto de 3 e 10 toneladas.

SECAGEM COM AQUECEDORES ARTIFICIAIS

Supondo-se a elevação de temperatura constante, utilizou-se os aumentos de temperatura sobre a temperatura ambiente sendo 5, 10 e $15^{\circ}C$.

A Tabela VI e VI-A mostra os resultados obtidos através da simulação de secagem com auxílio de aquecedores artificiais (eletricidade, gás, óleo, etc.).

Verifica-se pelos resultados mostrados que, à medida que se aumenta o incremento de temperatura (Δt), ocorre uma diminuição acentuada da umidade das camadas inferiores (supersecagem).

Modelo	I					
vazão de ar (m ³ /min)	100					
Toneladas	3			10		
Aumento de temperatura (°C)	5	10	15	5	10	15
Tempo de secagem						
t (dia)	1	1	1	3	2	2
t (horas)	13	10,5	9,0	50,5	39,5	34,0
Teor de umidade média (% dia)	11,89	11,45	11,19	10,38	9,61	8,99
Teor de umidade máxima (% b.u)	14,50	14,34	14,13	14,26	14,28	14,16
Teor de umidade mínima (% b.u)	9,92	9,27	9,00	8,27	7,5	6,65

TABELA VI - Umidades e tempo de secagem obtidos para o modelo I , com a utilização de aquecedores artificiais e aumentos de temperatura de 5, 10 e 15°C.

Modelo	II		
vazão de ar (m ³ /min)	100		
Toneladas	3		
Aumento de Temperatura (°C)	5	10	15
Tempo de secagem t (dia) t (horas)	1 19,5	1 13,0	1 10,0
Teor de umidade média (% b.u)	12,8	11,84	11,56
Teor de umidade máxima (% b.u)	14,41	14,29	14,40
Teor de umidade mínima (% b.u)	11,59	9,97	9,4

TABELA VI.A - Umidades e tempo de secagem obtidos para o modelo I, com a utilização de aquecedores artificiais e aumentos de temperatura de 5, 10 e 15°C.

Nota-se também que para a quantidade de produto de 10 toneladas submetidas a secagem em camada estacionária em silo, a supersecagem mostrou-se maior que para o caso de 3 toneladas. Isto ocorre devido à maior espessura da camada de grãos.

Comparando-se o tempo de secagem obtido pela simulação com ar natural e com aquecedores artificiais, constatou-se que com aumentos de temperatura ocorre uma diminuição progressiva dos tempos de secagem. Esta queda é mais significativa quando o incremento é de 5°C. Assim, para o caso de 3 t e vazão 100 m³/min, o tempo de secagem que era de 31,5 h. no caso de secagem com ar natural, caiu para 13,0h. (Figura 40).

SECAGEM COM COLETOR SOLAR:

Os resultados estão mostrados na Tabela VII.

Modelo	I		II	
Toneladas	3		10	3
vazão de ar (m ³ /min)	50	100	100	100
Tempo de secagem				
t (dia)	2	1	3	2
t (horas)	30,05	12,1	55,25	32,55
Teor de umidade média (% b.u)	11,75	11,87	11,53	12,98
Teor de umidade máxima (% b.u)	14,49	14,49	14,49	14,18
Teor de umidade mínima (% b.u)	10,05	9,9	10,03	12,16

TABELA VII - Umidades e tempo de secagem obtidos para os modelos I e II com a utilização de energia solar e vazões de ar de 50 e 100 m³/min.

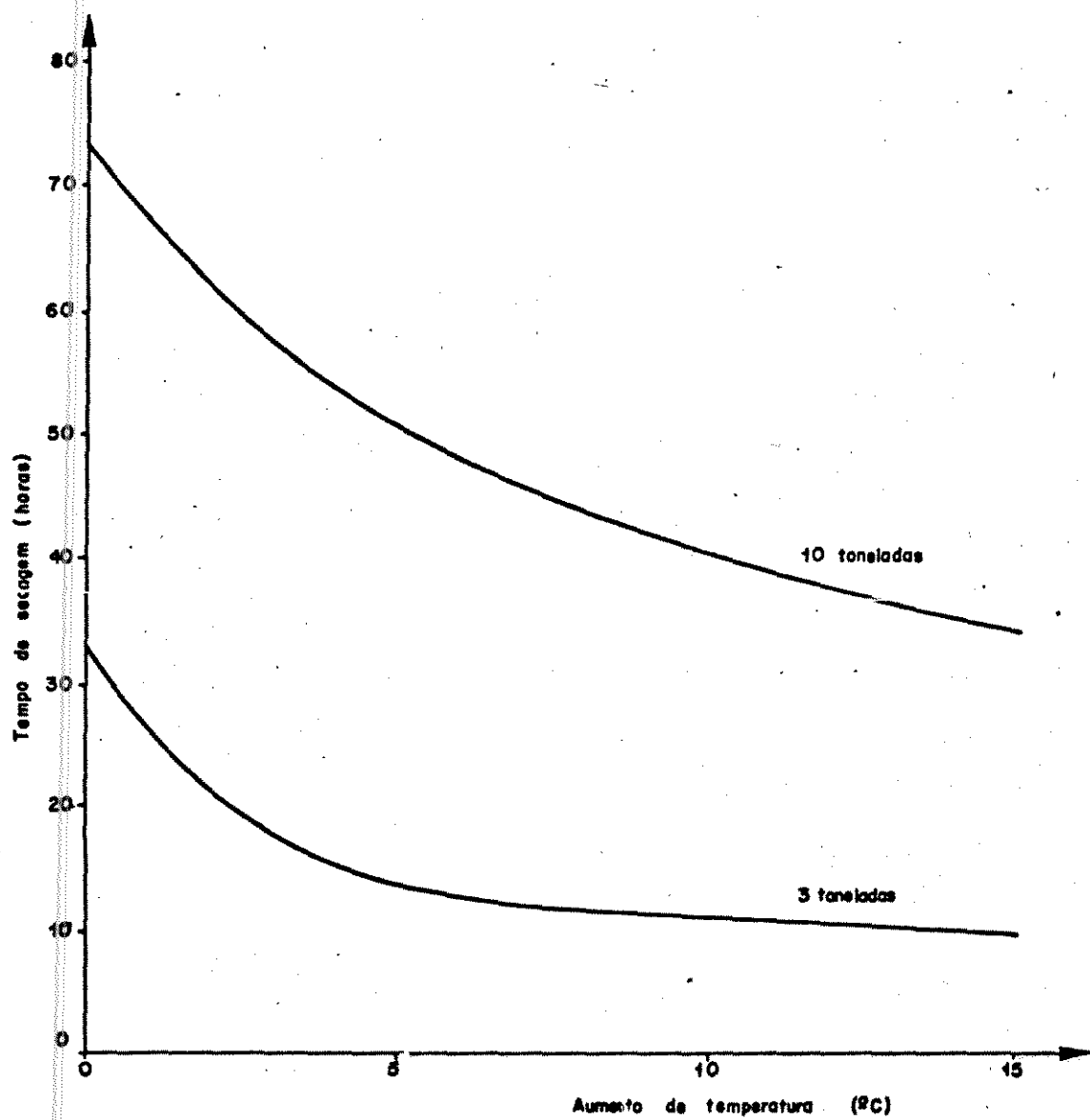


Figura 40. Tempo de secagem de milho em função do aumento de temperatura, com vazão de ar de $100 \text{ m}^3/\text{min}$.

Pelos resultados apresentados, verifica-se que no caso do modelo I, 3 t, vazão $100 \text{ m}^3/\text{min}$, o tempo de secagem com ar natural é de 31,5 horas, enquanto que para o coletor solar o tempo de secagem foi de 12,1 horas. Este tempo obtido com o coletor é quase o mesmo valor do que o obtido com aquecedores artificiais com $\Delta t = 5^\circ\text{C}$, que foi de 13,0 horas.

O modelo II não atinge o valor de umidade de 13% b.u com ar natural, mas com o coletor solar a secagem é obtida com tempo de 32,55 horas, e para aquecedores artificiais com $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ o tempo de secagem foi de 19,5 horas.

Evidentemente, existe a possibilidade de se diminuir o tempo de secagem pelo aumento maior de temperatura. Isto, porém, acarretará em investimento e gasto de energia maiores. Assim, um estudo levando em consideração estes fatores econômicos deverá ser realizado, a fim de obter dados que permitam a escolha do melhor processo de secagem.

7. CONCLUSÃO

Através da simulação matemática do sistema total obteve-se várias considerações a respeito do sistema de secagem considerado, cujo coletor solar compunha-se de um isolante coberto com uma chapa ondulada, absorvedora de radiação solar.

Verificou-se que no momento de passagem das nuvens as oscilações das temperaturas de saída do coletor solar, no caso dos regimes permanente e transitório, são diferentes, mesmo utilizando-se a lã de vidro como isolante, cujo valor da capacidade térmica é pequeno.

Mesmo com a grande capacidade térmica da pedra as oscilações ainda são importantes em regime transitório. Isto significa que a diferença de capacidade térmica do isolante não exerce muita influência sobre as oscilações.

Este efeito da igualdade de oscilações entre a pedra e a lã de vidro, além de que o rendimento útil diário ($\eta_{u,d}$) da pedra é menor que da lã de vidro, e que a secagem do produto durante o dia é mais eficiente, leva à conclusão que o uso de pedra como isolante não apresenta vantagens consideráveis neste tipo de coletor solar.

Verificou-se ainda que a espessura de pedra de 15 cm, para este coletor, é superdimensionada, e que quanto menor a vazão do ar ou quanto maior a área do coletor, mais altas são as oscilações de temperatura.

Na parte de secagem observou-se que esta varia consideravelmente conforme o modelo climatológico escolhido, o qual apresenta diferentes valores de temperatura ambiente, umidade relativa do ar de secagem e intensidade de radiação solar.

A secagem de 3 t de milho com a vazão de $2 \text{ m}^3/\text{min/t}$ nos

circu-se viável dentro do limite de deterioração estabelecido. No entanto, o mesmo não ocorreu para as quantidades de 10 e 50 t de milho. Assim, a vazão mínima deve ser determinada através da quantidade de produto que vai se secar, influenciando também a área do coletor solar e modelos climatológicos a serem utilizados.

A secagem com ar natural depende das condições climatológicas, podendo portanto tornar-se inviável dependendo da região a ser escolhida, mas com o coletor solar a secagem pode ser realizada, exceto em dias de grande nebulosidade.

As oscilações das temperaturas do ar para secagem, no momento de passagem das nuvens, principalmente as quedas bruscas de temperatura, parecem representar um parâmetro importante para a viabilidade de sementes.

Neste trabalho procedeu-se a variação de diferentes parâmetros tanto do coletor solar quanto do silo secador, mas há ainda outros fatores que devem ser variados, tais como a execução de modelos matemáticos para outros tipos de coletor solar, para diferentes produtos agrícolas, e uma variação maior de parâmetros geométricos e de materiais do sistema.

Com estes resultados, torna-se possível a obtenção de curvas tanto do coletor solar como do secador, as quais seriam de grande utilidade para os agricultores que venham a utilizar a energia solar para a secagem de seus produtos agrícolas.

Toda simulação matemática torna-se definitivamente comprovada se for comparada e confirmada com dados obtidos através de experimentos. Estes já estão sendo feitos no Departamento de Engenharia Agrícola da UNICAMP, assim como a variações de outros parâmetros na simulação matemática do sistema total, o que vem a completar este trabalho.

8. SIMBOLOGIA

- A = área da secção transversal do silo (m^2)
 A_c = área do coletor solar (m^2)
 ARM = energia armazenada (kw)
 C = calor específico do produto ($kcal/kg^{\circ}C$)
 C_a = calor específico do ar ($J/Kg^{\circ}C$)
 C_{ab} = calor específico da placa absorvente ($J/kg^{\circ}C$)
 C_{is} = calor específico do isolante ($J/kg^{\circ}C$)
 Δh_{fg} = aumento do calor latente de vaporização ($kcal/kg$)
 Δt = intervalo de tempo (h)
 Δx = espessura da camada elementar (cm)
 F' = fator de eficiência do coletor solar
 F_R = fator de remoção de calor do coletor solar
 h = altura do coletor (m)
 h_0 = coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície superior do isolante e o fluido (w/m^2)
 h_1 = coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície absorvente e o fluido (w/m^2)
 h_2 = coeficiente de transferência de calor por convecção entre o fluido e o isolante (w/m^2)
 h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície externa do isolante e o ambiente (w/m^2)
 $h_{r,ab-a}$ = coeficiente de transferência de calor por radiação entre a superfície superior da chapa absorvente e o ambiente (w/m^2)
 $h_{r,ab-is}$ = coeficiente de transferência de calor por radiação entre a superfície absorvente e o isolante (w/m^2)
 h_w = coeficiente de transferência de calor por convecção entre o vento e a superfície superior da chapa absorvente (w/m^2)

- i = inclinação do coletor solar ($^{\circ}$)
 λ = altura total da camada de produto (m)
 λ_{is} = espessura do isolante (cm)
 L = comprimento total do coletor solar (m)
 m = vazão mássica do fluído (kg/min)
 $(mc)_{ab}$ = capacidade térmica da placa absorvente ($J/^{\circ}C$)
 M_D = multiplicador de danos mecânicos
 M_T = multiplicador de temperatura
 M_U = multiplicador de umidade
 n = número de camadas
 n = número de dias transcorridos no ano
 P = peso específico do produto (kg/m^3)
 PMS = % de perda de matéria seca
 P_v = pressão de vapor do ar (mm Hg)
 P_{vs} = pressão de vapor saturado (mm Hg)
 q_u = energia útil do fluído por unidade de área (w/m^2)
 Q_u = energia útil do coletor solar (w)
 R = fator de conversão de radiação em superfície horizontal para radiação em superfície inclinada e razão para conversão de unidades.
 R_a = constante para o ar seco ($J/kg K$)
 RM_0 = razão de mistura do ar no instante t ($kg \text{ água}/kg \text{ ar se}$)
 RM_f = razão de mistura do ar no instante $t + t$ ($kg \text{ água}/kg \text{ ar}$)
 RU = razão de umidade do produto
 S = radiação solar absorvida por unidade de área do coletor solar (w/m^2)
 SH = radiação solar incidente na superfície horizontal (w/m)
 t_{eq} = tempo equivalente de secagem (h)
 t_0 = temperatura do ar no instante t ($^{\circ}C$)
 t_a = temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
 T_{ab} = temperatura da superfície absorvente ($^{\circ}C$)

T_e = temperatura do ar de entrada ($^{\circ}\text{C}$)
 T_f = temperatura do ar e do produto no instante $t+\Delta t$ ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{f_m} = temperatura média do fluido (ar) ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{g0} = temperatura do produto no instante t ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{is} = temperatura da superfície superior do isolante ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{is-n} = temperatura das n camadas de isolante ($^{\circ}\text{C}$)
 T_s = temperatura do ar na saída do coletor solar ($^{\circ}\text{C}$)
 U = teor de umidade do produto no instante t (% bu)
 U_b = coeficiente de transferência de calor por condução na parte inferior do coletor (isolante) ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)
 U_e = umidade de equilíbrio para o produto (% bu)
 U_f = teor de umidade do produto no instante $t+\Delta t$ (% bu)
 U_L = coeficiente de perdas do coletor solar ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)
 UR_{ar} = umidade relativa do ar (%)
 URE_s = umidade relativa de equilíbrio para o produto na situação de secagem (%)
 URE_u = umidade relativa de equilíbrio para o produto na situação de umidificação (%)
 U_t = coeficiente de transferência de calor por convecção e radiação, da parte superior do coletor para o ambiente ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)
 v = velocidade do vento (m/s)
 \dot{v} = vazão volumétrica do ar de entrada (m^3/min)
 vs = volume específico do ar de entrada (m^3/kg)
 W = largura do coletor (m)
 $\epsilon_{ab,i}$ = emissividade da superfície inferior da chapa absorvente
 $\epsilon_{ab,s}$ = emissividade da superfície superior da chapa absorvente
 ϵ_{is} = emissividade da superfície superior do isolante
 λ_a = condutividade térmica do ar ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)
 λ_{is} = condutividade térmica do isolante ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)
 μ = viscosidade dinâmica do ar ($\text{kg}/\text{min.m}$)

ρ_{is} = densidade do isolante (kg/m^3)

ρ_p = densidade de matéria seca (kg/m^3)

σ = constante de Boltzman ($\text{W/m}^2\text{°C}^4$)

α = fator de absorção da superfície absorvente

ϕ = latitude do local ($^\circ$)

δ = declinação (posição angular do sol no meio dia solar, com respeito ao plano do equador) ($^\circ$)

ω = ângulo horário ($^\circ$)

η_{arm} = porção de energia para uso após o pôr do sol

η_{ins} = rendimento instantâneo do coletor solar

$\eta_{s,d}$ = rendimento solar diário do coletor solar

$\eta_{u,d}$ = rendimento útil diário do coletor solar

9. ANEXO

9.1. Energia útil do coletor solar

Partindo-se das equações de balanço de energia para o regime permanente (Cap. 3) e fazendo-se:

$$T_{is} - T_{fm} = T'_{is}$$

$$T_{ab} - T_{fm} = T'_{ab}$$

$$T_{fm} - T_a = T'_a$$

Tem-se:

$$h_1 T'_{ab} + h_2 T'_{is} = q_u \quad (1')$$

$$- U_t (T'_{ab} + T'_a) - h_1 T'_{ab} + S - h_{r \text{ ab-is}} (T'_{ab} - T'_{is}) = 0 \quad (2')$$

$$- h_2 T'_{is} - U_b (T'_{is} + T'_a) + h_{r \text{ ab-is}} (T'_{ab} - T'_{is}) = 0 \quad (3')$$

Combinando-se as equações (2') e (3') tira-se:

$$T'_{is} = \frac{T'_a \left(U_b + \frac{h_{r \text{ ab-is}} U_t}{(U_t + h_1 + h_{r \text{ ab-is}})} \right) - \frac{h_{r \text{ ab-is}} \cdot S}{U_t + h_1 + h_{r \text{ ab-is}}}}{\left[\frac{h_{r \text{ ab-is}}^2}{U_t + h_1 + h_{r \text{ ab-is}}} - (h_2 + U_b + h_{r \text{ ab-is}}) \right]}$$

$$T'_{ab} = \frac{T'_a [U_b \cdot h_{r \text{ ab-is}} + U_t (h_2 + U_b + h_{r \text{ ab-is}})] - S(h_2 + U_b + h_{r \text{ ab-is}})}{h_{r \text{ ab-is}}^2 - (U_t + h_1 + h_{r \text{ ab-is}}) (h_2 + U_b + h_{r \text{ ab-is}})}$$

Substituindo-se T'_{is} e T'_{ab} em (1') tem-se que:

$$q_u = S \left[\frac{-h_1(h_2 + U_b + h_{r \text{ ab-is}}) - h_2 \cdot h_{r \text{ ab-is}}}{h_{r \text{ ab-is}}^2 - (U_t + h_1 + h_{r \text{ ab-is}})(h_2 + U_b + h_{r \text{ ab-is}})} \right] -$$

$$\dots T'_a \left\{ \frac{-h_1[U_b \cdot h_{r \text{ ab-is}} + U_t(h_2 + U_b + h_{r \text{ ab-is}})] - h_2[U_b(U_t + h_1 + h_{r \text{ ab-is}}) + U_t \cdot h_{r \text{ ab-is}}]}{h_{r \text{ ab-is}}^2 - (U_t + h_1 + h_{r \text{ ab-is}})(h_2 + U_b + h_{r \text{ ab-is}})} \right\}$$

Sendo q_u também escrito na forma

$$q_u = A \left(S - \frac{B}{A} T'_a \right)$$

onde $A = F'$ e $B/A = U_L$, e fazendo-se:

$$h_2 + U_b + h_{r \text{ ab-is}} = a$$

$$U_t + h_1 + h_{r \text{ ab-is}} = b$$

Obtém-se:

$$F' = - \left(\frac{h_1 \cdot a + h_2 \cdot h_{r \text{ ab-is}}}{h_{r \text{ ab-is}}^2 - b \cdot a} \right)$$

$$U_L = \frac{h_1(U_b \cdot h_{r \text{ ab-is}} + U_t \cdot a) + h_2(U_b \cdot b + U_t \cdot h_{r \text{ ab-is}})}{h_1 \cdot a + h_2 \cdot h_{r \text{ ab-is}}}$$

9.2. Temperatura do ar na saída do coletor:

A energia útil do coletor solar também pode ser escrita como:

$$Q_u = A_c F_r [S - U_L(T_e - T_a)]$$

Quando a temperatura do ar na entrada do coletor solar, T_e , é igual a temperatura ambiente, T_a , a equação acima se transforma em:

$$Q_u = A_c \cdot F_r \cdot S$$

Colocando-se a equação (3.8) na equação acima pode-se obter:

$$Q_u = A_c S \frac{\dot{m} C_a}{A_c U_L} \left(1 - e^{-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_a}} \right)$$

Por outra maneira, Q_u pode ser escrito como:

$$Q_u = \dot{m} C_a (T_s - T_a)$$

Igualando-se as duas equações de Q_u , tira-se a temperatura de saída:

$$T_s = T_a + \frac{S}{U_L} \left(1 - e^{-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_a}} \right)$$

9.3. Ângulo horário:

Ângulo horário, ω , iguala-se a zero ao meio dia solar e cada hora equivale a 15° de longitude, com manhãs positivas e tardes negativas.

Tempo solar:

Sendo o ângulo horário baseado no tempo solar, o qual não coin

cide com o tempo padrão, é necessário converter-se o tempo padrão para tempo solar pela equação seguinte:

$$\text{tempo solar} = \text{tempo padrão} + E + 4(L_{st} - L_{loc})$$

onde:

E = equação de tempo

L_{st} = meridiano padrão para a zona de tempo local

L_{loc} = longitude do local em questão

A equação de tempo, E, é calculada pelas equações:

- para $n < 100$

$$E = - \left(9 \operatorname{sen} \frac{(n-1)}{0.5} \right) - 5$$

- para $100 \leq n \leq 244$

$$E = \left(5 \operatorname{sen} \frac{(n-100)}{0,395} \right) - 1$$

- para $n > 242$

$$E = \left(18,6 \operatorname{sen} \frac{(n-242)}{0,685} \right) - 2,5$$

sendo n o nº de dias transcorridos no ano.

9.4. Programa de coletor solar em regime permanente:

```

DIMENSION TA(250,1),GH(250,1),UR(250,1),TS(550),UA(550),FNAME
*(4)
C REGIME PERMANENTE
C DATA FI,SS,OMG1,ALST,ALLC/-22.92,-30.,15.,45.,47.08/
C DATA CP,CK,U,PATM/1005.,0.0267,1.9E-5,960.0/
C VARIACOES DOS PARAMETROS:
C MATERIAIS ABSORVENTES E ISOLANTES
C ABSORVENTES: ALUMINIO , FERRO , AMIANTO
C DATA EPA1,EPA2,RF/.95,.95,.95/
C ISOLANTES: LA DE VIDRO , PEDRA E ISOPOR
C DATA EPI,CKI,ESPI/.95,0.1053,0.06/
C GEOMETRICOS: COMPRIMENTO , LARGURA , ALTURA
C DATA YL,W,H/20.,3.,.10/
C OPERACIONAIS: VAZAO DO AR(VA),TEMPERATURA DE SAIDA DO COLE
C *TOR(TS)
C DATA VA/100./
C CLIMATOLOGICOS: TEMPERATURA AMBIENTE(TA),VELOCIDADE DO VENTO
C *(V),RADIACAO SOLAR(GH),UMIDADE RELATIVA(UR),HORA INICIAL SOLA
C *R DO DIA(IH),MINUTOS INICIAIS SOLAR DO DIA(MM),HORA FINAL SOL
C *AR DO DIA(IS),HORA INICIAL SOLAR DO DIA SEGUINTE(JH),MINUTOS
C *INICIAIS SOLAR DO DIA SEGUINTE(LL),NUMERO DE LOOPS NO PERIODO
C *SOLAR(KK),EE,DIA
C DATA V/3./
C WRITE(3,800)
C READ(3,850)IH
C WRITE(3,880)
C READ(3,850)MM
C WRITE(3,1500)
C KP=((9*20)-(IH*20+MM/3))+1
C KG=((20*20)-(IH*20+MM/3))+1
C READ(3,180)KK
C LUN=6
C IRECLN=4
C L=1
C WRITE(3,260)
C READ(3,175)(FNAME(I),I=1,4)
C CALL OPEN(LUN,FNAME,IRECLN)
C K=250
C READ(LUN,REC=K,ERR=11)N,M
C GO TO 12
11 WRITE(3,290)
C PAUSE 10
12 DO 10 I=L,N
10 READ(LUN,REC=I,ERR=15)(TA(I,J),J=1,M)
C GO TO 17
15 WRITE(3,300)
C PAUSE 20
17 ENDFILE LUN
C WRITE(3,1010)
C READ(3,1015)NZ
C IF(NZ.EQ.0)GO TO 1020
C WRITE(2,190)(FNAME(I),I=1,4)
C WRITE(2,200)((I,J,TA(I,J),J=1,M),I=L,N)
1020 WRITE(3,280)
C READ(3,175)(FNAME(I),I=1,4)
C CALL OPEN(LUN,FNAME,IRECLN)
C READ(LUN,REC=K,ERR=22)N,M
C GO TO 25
22 WRITE(3,310)
C PAUSE 30

```

```

25      DO 20 I=L,N
26      READ(LUN,REC=I,ERR=27)(SH(I,J),J=1,M)
      GO TO 32
27      WRITE(3,320)
      PAUSE 40
32      ENDFILE LUN
      WRITE(3,1010)
      READ(3,1015)NZ
      IF(NZ.EQ.0)GO TO 1030
      WRITE(2,210)(FNAME(I),I=1,4)
      WRITE(2,220)((I,J,SH(I,J),J=1,M),I=L,N)
1030     WRITE(3,285)
      READ(3,175)(FNAME(I),I=1,4)
      CALL OPEN(LUN,FNAME,I,RECLN)
      READ(LUN,REC=K,ERR=92)N,M
      GO TO 28
92      WRITE(3,330)
      PAUSE 50
28      DO 72 I=1,N
72      READ(LUN,REC=I,ERR=63)(UR(I,J),J=1,M)
      GO TO 93
63      WRITE(3,340)
      PAUSE 60
93      ENDFILE LUN
      WRITE(3,1010)
      READ(3,1015)NZ
      IF(NZ.EQ.0)GO TO 1040
      WRITE(2,225)(FNAME(I),I=1,4)
      WRITE(2,230)((I,J,UR(I,J),J=1,M),I=1,N)
1040     WRITE(2,160)
      SOMA=0.
      SONA=0.
      WRITE(3,1300)
      READ(3,185)DIA
      WRITE(3,1350)
      READ(3,185)EE
      WRITE(2,1400)
      WRITE(2,1420)
      WRITE(2,115)CK,U,CP
      WRITE(2,116)V,VA,PATM
      WRITE(2,120)W,H,YL
      WRITE(2,121)CKI,ESPI,EPI
      WRITE(2,122)EPA1,EPA2,RF
      WRITE(2,101)EE,DIA,OMG1,ALST
      WRITE(2,102)ALLC,FI,SS
      TIADM=FLOAT(IH)*60.+FLOAT(MM)
      WRITE(2,1450)IH,MM
      LMA=0
      DO 5 K=1,N
      DO 5 J=1,M
      IC=0
      DC=0.
      DP=0.
54      DCC=(TA(K+1,1)-TA(K,1))/20.
      DPP=(UR(K+1,1)-UR(K,1))/20.
      LMA=LMA+1
      IF(K-KK)50,53,53
53      TAP=DC+TA(K,1)
      DC=DCC+DC
      URP=(DP+UR(K,1))*0.01

```

```

DP=DPP+DP
GO TO 49
50 TAP=TA(K,J)
URP=UR(K,J)*0.01
49 PVS=EXP(54.63-12301.69/(TAP*1.8+492.))-5.15*ALOG(TAP*1.8+492.))
UA(LMA)=0.622*URP*PVS/(PATM*14.7/10332.-URP*PVS)
PVS=PVS*10332./14.7
RA=53.35
VS=((RA*(TAP*1.8+492.)/(PATM*14.7/10332.*144.))*(1.+1.608*UA(LM
*A)))*0.06242
DB=VA/(VS*60.)
WRITE(3,500)K,J
C EE=-(9.*SIN((DIA-1.)/0.5))-5. .... PARA DIA<100.
C EE=(5.*SIN((DIA-100.)/0.395))-1. .... PARA 100.<=DIA<=244.
C EE=(18.6*SIN((DIA-242.)/0.685))-2.5 ... PARA DIA>242.
C OS VALORES DE TIADM e EE DEPENDEM DO DIA
C OS VALORES IH,MM,EE e DIA SERAO MUDADOS EM FUNCAO DO DIA
C COS(OMGS)=-SIN(FI)*SIN(DLTA)/(COS(FI)*COS(DLTA))
C OMGS EO ANGULO HORARIO DO INICIO E FIM DO DIA SOLAR
C TD=2./15.*COS(-TAN(FI)*TAN(DLTA))
C TD E O NUMERO DE HORAS MAXIMAS DE INSOLACAO
PI=3.141592
FIR=FI*PI/180.
SSR=SB*PI/180.
TIADH=TIADM/60.
TISDM=TIADM+EE+4.*(ALST-ALLC)
TISDH=TISDM/60.
IF(LMA-KK)71,71,73
73 S=0.
R=0.
SH(K,1)=0.
GO TO 41
71 OMG2=OMG1*(12.-TISDH)
OMG=OMG2-OMG1/20.*(FLOAT(K)-1.)
OMGR=OMG*PI/180.
DLTA=23.45*SIN((360.*(284.+DIA)/365.)*PI/180.)
DLTAR=DLTA*PI/180.
R=(COS(FIR-SSR)*COS(DLTAR)*COS(OMGR)+SIN(FIR-SSR)*SIN(DLTAR))/
*(COS(FIR)*COS(DLTAR)*COS(OMGR)+SIN(FIR)*SIN(DLTAR))
S=SH(K,J)*R*RF
IF(R-3.)40,40,69
69 S=50.
40 DD=5.67E-8
CH1=0.0158*(2.*DB/(W*U))*0.8*CK/(2.*H)
CH2=CH1
CHW=5.7+3.8*V
UB=CKI/ESPI
TAB=40.
2 TI=20.
4 CHRAA=EPA1*DD*((TAB+273.)**2.+(TAP+273.)**2.)*
*((TAB+273.)+(TAP+273.))
UT=CHW+CHRAA
CHRAI=DD*((TAB+273.)**2.+(TI+273.)**2.)*((TAB+273.)+(TI+273.))
*(1./EPA2+1./EPI-1.)
AA=CH2+UB+CHRAI
BB=UT+CH1+CHRAI
FPR=-((CH1*AA+CH2*CHRAI)/(CHRAI**2.-BB*AA)
UL=((CH1*(UB+CHRAI+UT*AA)+CH2*(UB*BB+UT*CHRAI))/(CH1*AA+CH2*CHRAI
*I)
TS(LMA)=TAP+(S/UL)*(1.-EXP(-(W*UL*FPR*YL)/(DB*CP))))

```



```

QU=DB*CP*(TS(LMA)-TAP)
FR=DB*CP/(W*YL*UL)*(1.-EXP(-(UL*FPR*W*YL/(L2*CP))))
TFM=TAP+QU*(1.-FF/FPR)/(W*YL*UL*FR)
TIM=(CH2*TFM+UB*TAP+CHRAI*TAB)/AA
DIT=TIM-TI
TI=TIM
IF(ABS(DIT)-0.05)3,3,4
3 TABB=QU/(CH1*W*YL)+2.*TFM-TI
DTP=TABB-TAB
TAB=TABB
IF(ABS(DTP)-0.05)1,1,2
1 RN=QU/(W*YL*S/RF)
SOMA=SOMA+QU
SONA=SONA+S/RF*W*YL
IF(MM.EQ.0)GO TO 52
IF(MM.EQ.30)GO TO 52
GO TO 188
72 WRITE(2,100)IH,MM
188 WRITE(2,950)R,S,SH(K,1)
WRITE(2,105)TIM,TFM,TABB
WRITE(2,110)TAP,TS(LMA)
WRITE(2,920)URP,UA(LMA)
WRITE(2,145)QU,RN
IF(MM.EQ.0)GO TO 152
IF(MM.EQ.30)GO TO 152
GO TO 55
152 WRITE(2,106)PVS,VS,DB
WRITE(2,103)TIADH,TISDH
WRITE(2,104)OMG,DLTA
WRITE(2,130)CHW,CHRAA,UT,UE
WRITE(2,135)CH1,CHRAI
WRITE(2,140)UL,FPR,FR
GO TO 55
41 TS(LMA)=TAP
55 MM=MM+3
IF(MM.EQ.60)GO TO 6
IC=IC+1
IF(IC-20)56,5,5
56 IF(K-KK)5,54,54
6 IF(IH-24)82,91,91
91 IH=0
82 IH=IH+1
MM=0
IC=IC+1
IF(IC-20)57,5,5
57 IF(K-KK)5,54,54
5 CONTINUE
RNG=SOMA/SONA
WRITE(2,700)RNG
WRITE(2,965)
WRITE(3,965)
WRITE(3,1045)
READ(3,175)(FNAME(I),I=1,4)
LUN=6
IRECLN=4
CALL OPEN(LUN,FNAME,IRECLN)
K=550
N=LMA
WRITE(LUN,REC=K)N
K=0

```

```

DO 1080 I=1,N
K=K+1
1080 WRITE(LUN,REC=K)UA(I)
ENDFILE LUN
WRITE(3,1010)
READ(3,1015)NZ
IF(NZ.EQ.0)GO TO 1090
DO 75 I=1,N
75 WRITE(2,967)(I,UA(I),I=1,N)
1090 WRITE(2,970)
WRITE(3,970)
WRITE(3,1045)
READ(3,175)(FNAME(I),I=1,4)
LUN=6
IRECLN=4
CALL OPEN(LUN,FNAME,IRECLN)
K=550
N=LMA
WRITE(LUN,REC=K)N
K=0
DO 1060 I=1,N
K=K+1
1060 WRITE(LUN,REC=K)TS(I)
ENDFILE LUN
WRITE(3,1010)
READ(3,1015)NZ
IF(NZ.EQ.0)GO TO 1070
DO 65 I=1,N
65 WRITE(2,980)(I,TS(I),I=1,N)
ZOMA=0.
TOMA=0.
DO 193 I=KP,KG
193 ZOMA=ZOMA+UA(I)
CONTINUE
KX=KG-KP+1
UAMED=ZOMA/KX
WRITE(2,1930)UAMED
DO 194 I=KP,KG
194 TOMA=TOMA+TS(I)
CONTINUE
TSMED=TOMA/KX
WRITE(2,1940)TSMED
98 FORMAT(/,' PARA 'I2':'I2' HORA(S) :-')
100 FORMAT(////////,' PARA 'I2':'I2' HORAS :-')
101 FORMAT(1X,'EE =' ,F6.2,13X,'DIA =' ,F6.2,12X,'OMG1 =' ,F5.2,10X
*, 'ALST =' ,F5.2)
102 FORMAT(1X,'ALLC =' ,F6.2,11X,'FI =' ,F6.2,13X,'SS =' ,F6.2)
103 FORMAT(1X,'TIADH =' ,F5.2,11X,'TISDH =' ,F5.2)
104 FORMAT(1X,'OMG =' ,F6.2,12X,'DLTA =' ,F6.2)
105 FORMAT(1X,'TIM =' ,F7.1,11X,'TFM =' ,F7.1,11X,'TABB =' ,F7.1)
106 FORMAT(1X,'PVS =' ,F6.2,12X,'VS =' ,F6.2,13X,'DB =' ,F5.2)
110 FORMAT(1X,'TA =' ,F7.1,12X,'TS =' ,F7.1)
111 FORMAT(1X,'DB =' ,F7.2,11X,'V =' ,F7.1)
115 FORMAT(1X,'CK =' ,F10.4,9X,'U =' ,E9.2,11X,'CP =' ,F10.1)
116 FORMAT(1X,'V =' ,F5.2,15X,'VA =' ,F6.2,13X,'PATM =' ,F7.2)
120 FORMAT(1X,'W =' ,F5.2,15X,'H =' ,F5.2,15X,'YL =' ,F10.2)
121 FORMAT(1X,'CKI =' ,F7.4,11X,'ESPI =' ,F7.2,10X,'EPI =' ,F5.2)
122 FORMAT(1X,'EPA1 =' ,F5.2,12X,'EPA2 =' ,F5.2,12X,'RF =' ,F5.2)
130 FORMAT(1X,'CHW =' ,F9.3,9X,'CHRAA =' ,F10.3,6X,'UT =' ,F9.2,
*9X,'UB =' ,F7.2)

```

```

135 FORMAT(1X,'CH1 =',F10.3,EX,'CHRAI =',F10.3)
140 FORMAT(1X,'UL =',F9.3,10X,'FPR =',F10.4,EX,'FR =',F10.4)
145 FORMAT(1X,'QU =',F9.1,10X,'RN =',F8.4)
150 FORMAT(1X,'S =',F7.1,12X,'SH =',F7.1,11X,'R' =',F7.2)
160 FORMAT(////,10X,'"ICOL1 REGIME PERMANENTE"',/)
170 FORMAT(I2)
175 FORMAT(4A4)
180 FORMAT(I3)
185 FORMAT(F6.2)
190 FORMAT(/,,' LEITURA DE DADOS "TEMPERATURA AMBIENTE" DADOS L
*IDOS NO ARQUIVO: '4A4,/)
200 FORMAT(5(' TA('I3','I2')='F5.1,5X))
210 FORMAT(/,,' LEITURA DE DADOS "RADIACAO SOLAR" DADOS LIDOS
*NO ARQUIVO: " '4A4,/)
220 FORMAT(5(' SH('I3','I2')='F6.1,5X))
225 FORMAT(/,,' LEITURA DE DADOS "UMIDADE RELATIVA" DADOS LIDOS
*NO ARQUIVO: " '4A4,/)
230 FORMAT(5(' UR('I3','I2')='F5.1,5X))
240 FORMAT(I3)
260 FORMAT(' QUAL O NOME DO 1o. ARQUIVO DE DADOS?',/)
280 FORMAT(' QUAL O NOME DO 2o. ARQUIVO DE DADOS?',/)
285 FORMAT(' QUAL O NOME DO 3o. ARQUIVO DE DADOS?',/)
290 FORMAT(' COMANDO ..... LINHA : 1200 ')
300 FORMAT(' COMANDO ..... LINHA : 1600 ')
310 FORMAT(' COMANDO ..... LINHA : 2100 ')
320 FORMAT(' COMANDO ..... LINHA : 2300 ')
330 FORMAT(' COMANDO ..... LINHA : 5500 ')
340 FORMAT(' COMANDO ..... LINHA : 5600 ')
500 FORMAT(/,30X,'I = 'I3,10X,'J = 'I2)
600 FORMAT(30X,'TS('I3') = 'F7.1)
700 FORMAT(////,' "RENDIMENTO DIARIO" ..... RNG =',F8.4)
800 FORMAT(' INSERIR HORA PARA INICIAR ..... IH = ')
810 FORMAT(' INSERIR HORA DE INICIO DO DIA SEGUINTE ..... JH = ')
890 FORMAT(' INSERIR MINUTOS INICIAIS DO DIA SEGUINTE ..... LL = ')
850 FORMAT(I2)
880 FORMAT(' INSERIR MINUTOS INICIAIS ..... MM = ')
900 FORMAT(I2)
920 FORMAT(1X,'UR =',F6.2,13X,'UA =',F5.3)
950 FORMAT(/,' R =',F7.2,12X,' S =',F7.1,12X,' SH =',F7.1)
965 FORMAT(////,' "VALORES DE UMIDADE ABSOLUTA"',/)
967 FORMAT(5(' UA('I3')='F6.3,5X))
970 FORMAT(////,' "TEMPERATURAS DE SAIDA DO COLETOR"',/)
980 FORMAT(5(' TS('I3')='F5.1,5X))
1000 FORMAT(/,,' "TEMPERATURAS DE SAIDA DO COLETOR ARQUIVADAS EM --
* TS/DAT -- "')
1300 FORMAT(/,' O VALOR DE ..... DIA = ')
1350 FORMAT(/,' O VALOR DE ..... EE = ')
1010 FORMAT(////,' SE DESEJA LISTAR, TYPE ( 1 ) <ENTER>'
*/, ' SE NAO TYPE ( 0 ) <ENTER>',/)
1015 FORMAT(I1)
1045 FORMAT(/,' QUAL SERA O NOME DO ARQUIVO ? (maximo 16 caracter
*es) ',/)
1400 FORMAT(/,1X,'"CONDICOES INICIAIS"',/)
1420 FORMAT(1X,' isolante : LA DE VIDRO absorvente : ALUMINIO',/)
1450 FORMAT(/,' HORA INICIAL 'I2' : 'I2' HORA(S) "-')
1500 FORMAT(/,' O VALOR DE ..... KK = ')
1930 FORMAT(/,1X,'UAMEDIA =',F6.3)
1940 FORMAT(/,1X,'TSMEDIA =',F5.1)
1070 STOP
END

```

9.5. Programa de coletor solar em regime transitório:

```

DIMENSION TA(250,1),SH(250,1),UR(250,1),TS(550),UA(550),TI(30),
*TI(5),FNAME(4)
C REGIME TRANSIENTE
C DATA FI,SS,ONG1,ALST,ALLO/-22.92,-30.,15.,45.,47.08/
C DATA CP,CK,U,PATM/1003.,0.0267,1.9E-5,9601.0/
C VARIACOES DOS PARAMETROS:
C MATERIAIS ABSORVENTES E ISOLANTES
C ABSORVENTES: ALUMINIO , FERRO , AMIANTO
C DATA ESPAB,ROAB,CPAB,EPA1,EPA2,RF/.002,2685.,870.,.95,.95,.95/
C ISOLANTES: LA DE VIDRO , PEDRA E ISOPOR , NUMERO DE CAMADAS
C *DO ISOLANTE(NN)
C DATA CKI,ROI,CPI,EPI1,EPI2,DT,DX/0.1053,1888.0,850.0,.95,.95,
*.5,.03/
C GEOMETRICOS: COMPRIMENTO , LARGURA , ALTURA
C DATA VL,W,H/20.,3 ,.10/
C OPERACIONAIS: VAZAO DO AR(VA),TEMPERATURA DE SAIDA DO COLETOR(
C *TS)
C DATA VA/100./
C CLIMATOLOGICOS: TEMPERATURA AMBIENTE(TA),VELOCIDADE DO VENTO(V)
C *,RADIACAO SOLAR(SH),UMIDADE RELATIVA(UR),HORA INICIAL SOLAR DO D
C *IA(IH),MINUTOS INICIAIS SOLAR DO DIA(MM),HORA FINAL SOLAR DO DIA
C *(IS),HORA INICIAL SOLAR DO DIA SEGUINTE(JH),MINUTOS INICIAIS SOL
C *AR DO DIA SEGUINTE(LL),NUMERO DE LOOPS NO PERIODO SOLAR(KK),EE,
C *DIA
C DATA V/3./
C WRITE(3,800)
C READ(3,850)IH
C WRITE(3,880)
C READ(3,850)MM
C KP=((9*20)-(IH*20+MM/3))+1
C KG=((21*20)-(IH*20+MM/3))+1
C WRITE(3,820)
C READ(3,850)IS
C WRITE(3,1500)
C READ(3,180)KK
C LUN=6
C IRECLN=4
C L=1
C WRITE(3,260)
C READ(3,175)(FNAME(I),I=1,4)
C CALL OPEN(LUN,FNAME,IRECLN)
C K=250
C READ(LUN,REC=K,ERR=11)N,M
C GO TO 12
11 WRITE(3,290)
C PAUSE 10
12 DO 10 I=L,N
10 READ(LUN,REC=I,ERR=15)(TA(I,J),J=1,M)
C GO TO 17
15 WRITE(3,300)
C PAUSE 20
17 ENDFILE LUN
C WRITE(3,1010)
C READ(3,1015)NZ
C IF(NZ.EQ.0)GOTO 1020
C WRITE(2,190)(FNAME(I),I=1,4)
C WRITE(2,200)((I,J,TA(I,J),J=1,M),I=L,N)
1020 WRITE(3,250)
C READ(3,175)(FNAME(I),I=1,4)

```

```

READ(LUN,REC=K,ERR=22)N,M
GO TO 25
22 WRITE(3,310)
PAUSE 30
25 DO 20 I=L,N
27 READ(LUN,REC=I,ERR=27)(SH(I,J),J=1,M)
GO TO 32
27 WRITE(3,320)
PAUSE 40
32 ENDFILE LUN
WRITE(3,1010)
READ(3,1015)NZ
IF(NZ.EQ.0)GOTO 1030
WRITE(2,210)(FNAME(I),I=1,4)
WRITE(2,220)((I,J,SH(I,J),J=1,M),I=L,N)
1030 WRITE(3,285)
READ(3,175)(FNAME(I),I=1,4)
CALL OPEN(LUN,FNAME,IROCLN)
READ(LUN,REC=K,ERR=92)N,M
GO TO 28
92 WRITE(3,330)
PAUSE 50
28 DO 72 I=1,N
72 READ(LUN,REC=I,ERR=63)(UR(I,J),J=1,M)
GO TO 93
63 WRITE(3,340)
PAUSE 60
93 ENDFILE LUN
WRITE(3,1010)
READ(3,1015)NZ
IF(NZ.EQ.0)GO TO 1040
WRITE(2,225)(FNAME(I),I=1,4)
WRITE(2,230)((I,J,UR(I,J),J=1,M),I=1,N)
1040 WRITE(2,160)
AMA=W*YL*ESPAB*ROAB
AMCAB=AMA*CPAB
SOMA=0.
SONA=0.
SONI=0.
SONAA=0.
ARM=0.
WRITE(3,1300)
READ(3,185)DIA
WRITE(3,1350)
READ(3,185)EE
WRITE(3,1050)
READ(3,170)NN
ESPI=FLOAT(NN)*DX-DX
WRITE(2,1400)
WRITE(2,1420)
WRITE(2,115)CK,U,CP
WRITE(2,116)V,VA,PATM
WRITE(2,120)W,H,YL
WRITE(2,121)CKI,ROI,CPI
WRITE(2,122)EPI1,EPI2,DT,DX
WRITE(2,119)NN,ESPI
WRITE(2,123)ESPAB,ROAB,CPAB
WRITE(2,124)EPA1,EPA2,RF
WRITE(2,101)EE,DIA,OMG1,ALST
WRITE(2,102)ALLC,FI,SS

```

```

TIADM=FLOAT(IH)*60 +FLOAT(MM)
DO 29 I=1,NN
29 TI(I)=TA(1,1)
CONTINUE
TAB=TA(1,1)
TSP=TA(1,1)
TFM=TA(1,1)
WRITE(2,1450) IH,MM
WRITE(2,990) TA(1,1),TAB,TFM,TSP
WRITE(2,900)(I, TI(I), I=1,NN)
LMA=0
DO 5 K=1,N
DO 5 J=1,M
IC=0
DC=0.
DP=0.
54 ISOMA=0
DCC=(TA(K+1,1)-TA(K,1))/20.
DPP=(UR(K+1,1)-UR(K,1))/20.
LMA=LMA+1
IF(K-KK)50,53,53
53 TAP=DC+TA(K,1)
DC=DCC+DC
URP=(DP+UR(K,1))*0.01
DP=DPP+DP
GO TO 49
50 TAP=TA(K,J)
URP=UR(K,J)*0.01
49 PVS=EXP(54.63-12301.69/(TAP*1.8+492.))-5.19*ALOG(TAP*1.8+492.)
UA(LMA)=0.622*URP*PVS/(PATM*14.7/10332.-URP*PVS)
PVS=PVS*10332./14.7
RA=53.35
VS=((RA*(TAP*1.8+492.)/(PATM*14.7/10332.*144.))*(1.+1.608*UA(L
*A)))*0.06242
DB=VA/(VS*60.)
51 ISOMA=ISOMA+1
IF(K-KK)80,81,81
80 IF(ISOMA-6)13,14,14
81 IF(ISOMA-6)13,85,85
13 TAA=TAP
GO TO 16
14 TAA=TA(K+1,J)
GO TO 16
85 TAA=TAP+DCC
C EE=-(9.*SIN((DIA-1.)/0.5))-5. .... PARA DIA<100.
C EE=(5.*SIN((DIA-100.)/0.395))-1. .... PARA 100.<=DIA<=244.
C EE=(18.6*SIN((DIA-242.)/0.685))-2.5 ... PARA DIA>242.
C OS VALORES DE TIADM e EE DEPENDEM DO DIA
C OS VALORES IH,MM,EE e DIA SERAO MUDADOS EM FUNCAO DO DIA
C COS(OMGS)=-SIN(FI)*SIN(DLTA)/(COS(FI)*COS(DLTA))
C OMGS EO ANGULO HORARIO DO INICIO E FIM DO DIA SOLAR
C TD=2./15.*ACOS(-TAN(FI)*TAN(DLTA))
C TD E O NUMERO DE HORAS MAXIMAS DE INSOLACAO
16 PI=3.141592
FIR=FI*PI/180.
SSR=SS*PI/180.
TIADH=TIADM/60.
TISDM=TIADM+EE+4.*(ALST-ALLC)
TISDH=TISDM/60.
IF(LMA-8)55,59,60

```

```

60      S=0.
        SH(K,1)=0.
        GO TO 58
59      OMG2=OMG1*(12.-TISDH)
        OMG=OMG2-OMG1/20.*(FLOAT(K)-1.)
        OMGR=OMG*PI/180.
        DLTAR=DLTA*PI/180.
        R=(COS(FIR-SSR)*COS(DLTAR)*COS(OMGR)+SIN(FIR-SSR)*SIN(DLTAR))/
        *(COS(FIR)*COS(DLTAR)*COS(OMGR)+SIN(FIR)*SIN(DLTAR))
        S=SH(K,1)*R*RF
        IF(R-3.)58,58,69
69      S=50.
58      DD=5.67E-8
        CH1=0.0158*(2.*DB/(W*U))**.6*CK/(2.*H)
        CH2=CH1
        HQ=CH1
        CHW=5.7+3.8*V
        HC=CHW
        CHRAA=EPA1*DD*((TAB+273.)**2.+(TAP+273.)**2.)*((TAB+
        *273.)+(TAP+273.))
        UT=CHW+CHRAA
        CHRAI=DD*((TAB+273.)**2.+(TI(1)+273.)**2.)*((TAB+273.)+
        *(TI(1)+273.))/(1./EPA2+1./EPI1-1.)
        CHRIA=EPI2*DD*((TI(NN)+273.)**2.+(TAP+273.)**2.)*((TI(NN
        *)+273.)+(TAP+273.))
        A=(2.*CKI*DT)/(ROI*CPI*(DX**2.))*60.
        B=(HQ*DX)/CKI
        C=(HC+CHRIA)*DX/CKI
        P=(CHRAI*DX)/CKI
        IF(KW.EQ.1)GO TO 21
        IF(IH-21)201,201,21
201      CC=(HC+CHRIA)*(TI(NN)-TAP)
        CCP=CC
        CB=UT*(TAB-TAP)
        CBP=CB
        QU=DB*CF*(TSP-TAP)
        SONI=SONI+QU
        QA=W*YL*(S-CC-CB)-QU
        IF(TI(NN)-TAP)42,42,43
43      CC=0.
42      IF(TAB-TAP)44,44,45
45      CB=0.
44      CARS=W*YL*(S/RF-CC-CB)
        SONAA=SONAA+CARS
        IF(LMA-KK)70,70,21
70      SOMA=SOMA+QU
        ARM=ARM+QA
        RN=QU/CARS
        SONA=SONA+CARS
        KKA=KK+2
21      IF(ISOMA-1)77,77,30
77      TS(LMA)=TSP
        WRITE(3,98)IH,MM
        IF(MM.EQ.0)GO TO 52
        IF(MM.EQ.30)GO TO 52
        IF(K-KKA)188,188,30
52      WRITE(2,100)IH,MM
        WRITE(2,130)CHW,CH1,CHRIA
        WRITE(2,135)CHRAA,CHRAI,UT

```

```

WRITE(2,960)R,S,SH(K,1)
GO TO 199
198 WRITE(2,950)R,S,SH(K,1)
WRITE(2,951)CCP,CBP,CARS
WRITE(2,144)QU,QA,RN
199 WRITE(2,990)TAP,TAB,TFM,TS(LMA)
WRITE(2,900)(I,TI(I),I=1,NN)
WRITE(2,920)URP,UA(LMA)
IF(MM.EQ.0)GO TO 152
IF(MM.EQ.30)GO TO 152
GO TO 30
152 WRITE(2,105)PVS,VS,DB
WRITE(2,103)TIADH,TISDH
WRITE(2,104)OMG,DLTA
WRITE(2,111)A,B,C,P
WRITE(2,112)CCP,CBP,CARS
WRITE(2,145)QU,QA,RN,ARM
30 TABV=TAB
TAB=TAB+DT*60.*W*YL/AMCAB*(S-UT*(TAB-TAP)-CH
*1*(TAB-TFM)-CHRAI*(TAB-TI(1)))
TIV(1)=TI(1)
TI(1)=A*B*TFM+A*P*TABV+A*TI(2)+(1.-A*B-A*P-A)*TI(1
*)
TIV(2)=TI(2)
TI(2)=A*(TIV(1)+TI(3))/2.+(1.-A)*TI(2)
TIV(3)=TI(3)
TI(3)=A*(TIV(2)+TI(4))/2.+(1.-A)*TI(3)
TIV(4)=TI(4)
TI(4)=A*(TIV(3)+TI(5))/2.+(1.-A)*TI(4)
TIV(5)=TI(5)
TI(5)=A*(TIV(4)+TI(6))/2.+(1.-A)*TI(5)
TI(6)=A*TIV(5)+A*C*TAP+(1.-A-A*C)*TI(6)
XR=YL*W*CH1/(DB*CP)
TFM=((XR-1.+EXP(-XR))*(TAB+TI(1))+(1.-EXP(-X
*R))*TAA)/(2.*XR-1.+EXP(-XR))
TSP=YL*W/(DB*CP)*(CH1*(TAB-TFM)-CH2*(TFM
*-TI(1)))+TAA
IF(ISOMA-6)51,7,7
7 MM=MM+3
IF(MM.EQ.60)GO TO 6
IC=IC+1
IF(IC-20)56,5,5
56 IF(K-KK)5,54,54
6 IF(IH-24)82,91,91
91 IH=0
KW=1
82 IH=IH+1
MM=0
IC=IC+1
IF(IC-20)57,5,5
57 IF(K-KK)5,54,54
5 CONTINUE
RNG=SOMA/SONA
RNGU=SONI/SONAA
RNARM=(SONI-SOMA)/ARM
WRITE(2,700)RNG
WRITE(2,760)RNARM
WRITE(2,750)RNGU
WRITE(2,965)
WRITE(3,965)

```



```

WRITE(3,1045)
READ(3,175)(FNAME(I),I=1,4)
LUN=6
IRECLN=4
CALL OPEN(LUN,FNAME,IRECLN)
K=550
N=LMA
WRITE(LUN,REC=K)N
K=0
DO 1080 I=1,N
K=K+1
1080 WRITE(LUN,REC=K)UA(I)
ENDFILE LUN
WRITE(3,1010)
READ(3,1015)NZ
IF(NZ.EQ.0)GO TO 1090
DO 75 I=1,N
75 WRITE(2,967)(I,UA(I),I=1,N)
1090 WRITE(2,970)
WRITE(3,970)
WRITE(3,1045)
READ(3,175)(FNAME(I),I=1,4)
LUN=6
IRECLN=4
CALL OPEN(LUN,FNAME,IRECLN)
K=550
N=LMA
WRITE(LUN,REC=K)N
K=0
DO 1060 I=1,N
K=K+1
1060 WRITE(LUN,REC=K)TS(I)
ENDFILE LUN
WRITE(3,1010)
READ(3,1015)NZ
IF(NZ.EQ.0)GO TO 1070
DO 65 I=1,N
65 WRITE(2,980)(I,TS(I),I=1,N)
ZOMA=0.
TOMA=0.
DO 193 I=KP,KG
ZOMA=ZOMA+UA(I)
193 CONTINUE
KX=KG-KP+1
UAMED=ZOMA/KX
WRITE(2,1930)UAMED
DO 194 I=KP,KG
TOMA=TOMA+TS(I)
194 CONTINUE
TSMED=TOMA/KX
WRITE(2,1940)TSMED
98 FORMAT(/,' PARA 'I2':'I2' HORA(S) :-'/)
100 FORMAT(////,' PARA 'I2':'I2' HORAS :-'')
101 FORMAT(1X,'EE =' ,F6.2,13X,'DIA =' ,F6.2,12X,'OMG1 =' ,F5.2,12X
*, 'ALST=' ,F5.2)
102 FORMAT(1X,'ALLC =' ,F6.2,11X,'FI =' ,F6.2,13X,'SS =' ,F5.1)
103 FORMAT(1X,'TIADH =' ,F5.2,11X,'TISDH =' ,F5.2)
104 FORMAT(1X,'OMG =' ,F6.2,12X,'DLTA =' ,F6.2)
105 FORMAT(1X,'PVS =' ,F6.2,12X,'VS =' ,F6.2,13X,'DB =' ,F5.2)
106 FORMAT(1X,'JFM =' ,F7.1,11X,'TAB =' ,F7.1)

```

```

111 FORMAT(1X,'A =',F7.3,13X,'B =',F7.3,13X,'C =',F7.3,
*14X,'F =',F7.3)
112 FORMAT(1X,'CCP =',F7.1,12X,'CBP =',F7.1,12X,'
*CARS =',F7.1)
115 FORMAT(1X,'CK =',F10.4,9X,'U =',E12.2,8X,'CP =',F10.1)
116 FORMAT(1X,'V =',F5.2,15X,'VA =',F6.2,13X,'PATM =',F8.2)
120 FORMAT(1X,'W =',F5.2,15X,'H =',F5.2,15X,'YL =',F10.2)
121 FORMAT(1X,'CKI =',F9.4,9X,'ROI =',F7.2,11X,'CPI =',F7.2)
122 FORMAT(1X,'EPI1 =',F5.2,12X,'EPI2 =',F5.2,12X,'DT =',F5.2,14X,
*'DX =',F5.2)
119 FORMAT(1X,'NN =',I2,17X,'ESPI =',F5.2)
123 FORMAT(1X,'ESPAB =',F7.4,9X,'ROAB =',F7.2,10X,'CPAB =',F7.2)
124 FORMAT(1X,'EPA1 =',F5.2,12X,'EPA2 =',F5.2,12X,'RF =',F5.2)
130 FORMAT(1X,'CHW =',F8.3,10X,'CH1 =',F7.3,11X,'CHRIA =',F7.3)
135 FORMAT(1X,'CHRAA =',F7.3,9X,'CHRAI =',F7.3,9X,'UT =',F7.2)
145 FORMAT(1X,'QU =',F15.1,4X,'QA =',F16.1,3X,'RN =',F6.3
*,14X,'ARM =',F12.1)
146 FORMAT(1X,'QU =',F7.1,13X,'QA =',F8.1,13X,'RX =',F6.3)
150 FORMAT(////,10X,'ISOL2 REGIME TRANSIENTE',/)
170 FORMAT(I2)
175 FORMAT(4A4)
180 FORMAT(I3)
185 FORMAT(F6.2)
190 FORMAT(//,' LEITURA DE DADOS "TEMPERATURA AMBIENTE" DADOS
*IDOS NO ARQUIVO: "4A4,/)
200 FORMAT(5(' TA('I3','I2')=F5.1,5X))
210 FORMAT(//,' LEITURA DE DADOS "RADIACAO SOLAR" DADOS LIDOS
*NO ARQUIVO: "4A4,/)
220 FORMAT(5(' SH('I3','I2')=F6.1,5X))
225 FORMAT(//,' LEITURA DE DADOS "UMIDADE RELATIVA" DADOS LIDOS
*NO ARQUIVO: "4A4,/)
230 FORMAT(5(' UR('I3','I2')=F5.1,5X))
240 FORMAT(I3)
260 FORMAT(' QUAL O NOME DO 1o. ARQUIVO DE DADOS?',/)
280 FORMAT(' QUAL O NOME DO 2o. ARQUIVO DE DADOS?',/)
285 FORMAT(' QUAL O NOME DO 3o. ARQUIVO DE DADOS?',/)
290 FORMAT(' COMANDO ..... LINHA : 1200 ')
300 FORMAT(' COMANDO ..... LINHA : 1600 ')
310 FORMAT(' COMANDO ..... LINHA : 2100 ')
320 FORMAT(' COMANDO ..... LINHA : 2300 ')
330 FORMAT(' COMANDO ..... LINHA : 5500 ')
340 FORMAT(' COMANDO ..... LINHA : 5600 ')
500 FORMAT(//,30X,'I = 'I3,10X,'J = 'I2)
600 FORMAT(30X,'TS('I3') = 'F7.1)
700 FORMAT(///,' "RENDIMENTO SOLAR DIARIO" ..... RNG =',F8.4)
750 FORMAT(/,' "RENDIMENTO UTIL DIARIO".....RNGU=',F8.4)
760 FORMAT(///,' "EFICIENCIA DE ARMAZENAMENTO DE CALOR" ..RNARM=
*,F8.4)
800 FORMAT(' INSERIR HORA PARA INICIAR ..... IH = ')
810 FORMAT(' INSERIR HORA DE INICIO DO DIA SEGUINTE ..... JH = ')
820 FORMAT(' INSERIR HORA DO POR DO SOL ..... IS = ')
850 FORMAT(I2)
880 FORMAT(' INSERIR MINUTOS INICIAIS ..... MM = ')
890 FORMAT(' INSERIR MINUTOS INICIAIS DO DIA SEGUINTE ..... LL = ')
900 FORMAT(5(' TI('I3')=F5.1,9X))
951 FORMAT(1X,'CCP =',F7.1,12X,'CBP =',F7.1,12X,'CAR
*S =',F10.1)
920 FORMAT(1X,'UR =',F6.2,13X,'UA =',F5.3)
950 FORMAT(/,' R =', F7.2, 12X,' S =',F7.1,12X,' SH =',F7.1)
960 FORMAT(' R =', F7.2, 12X,' S =',F7.1,12X,' SH =',F7.1)

```

```

965  FORMAT(///,' "VALORES DE UMIDADE ABSOLUTA"'/)
967  FORMAT(5(' UA('I3')='F6.3,5X))
970  FORMAT(///,' "TEMPERATURAS DE SAIDA DO COLETOR"'/)
980  FORMAT(5(' TS('I3')='F5.1,5X))
990  FORMAT(' TA =' ,F7.1,11X,' TAB =' ,F7.1, 10X,' TFM =' ,F7.1,10X,
*, ' TS =' ,F7.1)
995  FORMAT(/,' TA =' ,F7.1,11X,' TAB =' ,F7.1, 10X,' TFM =' ,F7.1,
*10X,' TS =' ,F7.1)
1000  FORMAT(///,' "TEMPERATURAS DE SAIDA DO COLETOR ARQUIVADAS EM --
* TS/DAT -- "')
1010  FORMAT(///,' SE DESEJA LISTAR,      TYPE      ( 1 ) <ENTER>'
*/,' SE      N A O      TYPE      ( 0 ) <ENTER>'//)
1015  FORMAT(I1)
1045  FORMAT(/,' QUAL SERA O NOME DO ARQUIVO ?- (maximo 16 caracteres
*s) ',/)
1050  FORMAT(/,' O VALOR DE ..... NN = ')
1150  FORMAT(1X,' S = 50.')
```

1250 FORMAT(1X,'S =' ,F7.1)

1300 FORMAT(/,' O VALOR DE DIA = ')

1350 FORMAT(/,' O VALOR DE EE = ')

1400 FORMAT(//,1X,' "CONDICOES INICIAIS" ',/)

1420 FORMAT(1X,' isolante : LA DE VIDRO absorvente : ALUMINIO',/)

1450 FORMAT(/,' HORA INICIAL 'I2':'I2' HORA(S) :-')

1500 FORMAT(/,' O VALOR DE KK = ')

1930 FORMAT(/,1X,'UAMEDIA =' ,F6.3)

1940 FORMAT(/,1X,'TSMEDIA =' ,F5.1)

1070 STOP

END

9.6. Programa de secagem:

```

      DIMENSION DETERI(21),UBS(21),UBU(21),TAR(500),UR(500),TEPGR(21)
      *,TEMDET(21),MAJOR(30),RM(500),T(500),TGUESS(50),UA(550),TS(550),
      *FNAME(4),HG(6)
      DATA TUIG,VAZAO,AREA,ALTURA,TMUFG,TUMAX,DELTAT/20.,100.,15.9,
      *0.25,13.,15.5,0.05/
      DATA NDT,DELPRT,NCAM/120,0.5,10/
      XX=0.
      WRITE(2,1005)TUIG,VAZAO,AREA
      WRITE(2,1011)ALTURA,TMUFG,TUMAX,DELTAT
      WRITE(2,1016)NDT,DELPRT,NCAM
      DO 5 JL=1,NDT
      WRITE(3,800)
      READ(3,850)IH
      WRITE(3,880)
      READ(3,850)MM
      WRITE(3,810)
      READ(3,850)JH
      WRITE(3,890)
      READ(3,850)LL
      IF(JL.EQ.1)UAI=TUIG*0.01
      IF(UAI-.16)996,996,997
996  WRITE(3,1002)
      READ(3,1015)LQ
      IF(LQ.EQ.1)GO TO 997
      IF(XX.EQ.1)GO TO 1001
      TMAX=20.-FLOAT(IH)-FLOAT(MM)/60.
      TEMPOI=0.
      XX=1.
      GO TO 153
1001  TMAX=24.
      TEMPOI=24.-20.+FLOAT(IH)+FLOAT(MM)/60.
      GO TO 153
997  TMAX=(24.*20.-(FLOAT(IH)*20.+FLOAT(MM)/3.)+(FLOAT(JH)*20.+
      *FLOAT(LL)/3.))*0.05
      TEMPOI=0.
153  LUN=6
      IRECLN=4
      WRITE(3,360)
      READ(3,175)(FNAME(I),I=1,4)
      CALL OPEN(LUN,FNAME,IRECLN)
      K=550
      READ(LUN,REC=K)N
      DO 105 I=1,N
105  READ(LUN,REC=I)UA(I)
      ENDFILE LUN
      WRITE(3,1010)
      READ(3,1015)NZ
      IF(NZ.EQ.0)GO TO 1065
      WRITE(3,390)(FNAME(I),I=1,4)
      WRITE(2,200)(I,UA(I),I=1,N)
1065  WRITE(3,390)
      READ(3,175)(FNAME(I),I=1,4)
      CALL OPEN(LUN,FNAME,IRECLN)
      READ(LUN,REC=K)N
      DO 106 I=1,N
106  READ(LUN,REC=I)TS(I)
      ENDFILE LUN
      WRITE(3,1010)
      READ(3,1015)NZ

```

```

IF(NZ.EQ.0)GO TO 1075
WRITE(3,210)(FNAME(1),I=1,4)
WRITE(2,215)(I,TS(I),I=1,N)
1075 WRITE(3,80)
READ(3,85)TAM
TEMPI=TAM
IF(JL.NE.1)GO TO 97-
VAZAOI=VAZAO/(AREA*ALTURA*0.75)
WRITE(3,1025)VAZAOI
TEMPO=0.0
DO 3 I=1,NCAM
TEMDET(I)=0.
3 CONTINUE
DO 4 J=1,NCAM
UBS(J)=(TUIG/(100.-TUIG))
UBU(J)=TUIG*0.01
4 CONTINUE
97 TPRINT=0.0
DO 8 J=1,NCAM
TEPGR(J)=TEMPI
8 CONTINUE
DO 2 J=1,NCAM
MAJOR(J)=J
2 CONTINUE
B=TEMPO
IF(TEMPOI.GT.0.0)GO TO 530
GO TO 131
530 CONTINUE
DO 132 I=1,NCAM
U=UBU(I)
DM=1.0
TR=230.
UBSE=U/(1.-U)*100.
XMM=0.103*(EXP(455./UBSE**1.53)-0.00845*UBSE+1.558)
IF(TEPGR(I)-15.6)190,120,120
190 XMT=128.76*EXP(-0.1456*TEPGR(I)-2.592)
GO TO 170
120 IF(U-0.19)130,130,140
130 U=0.19
140 IF(U-0.28)160,160,150
150 U=0.28
160 XMT=32.3*EXP(-0.1044*TEPGR(I)-1.856)+(U-0.19)*EXP(0.61*(1.8*TEP
*GR(I)-28.)/60.)
170 STEELE=TR*XMM*XMT*DM
TEMDET(I)=TEMDET(I)+(TEMPOI*230.)/STEELE
DETERI(I)=0.0884*(EXP(0.006*TEMDET(I))-1.)+0.00102*TEMDET(I)
132 CONTINUE
131 CONTINUE
ASA=0.0
DELTA=0.0
V00=0.0
TTEMPO=TEMPOI
NN=0
15 IF(TTEMPO-TMAX)116,117,117
116 TTEMPO=TTEMPO+DELTA
MM=MM+3
IF(MM-60)88,89,88
89 IF(IH-24)82,94,94
94 IH=0
82 IH=IH+1

```

6677
88

```

MM=0
CONTINUE
NN=NN+1
TPH=TS(NN)
TA=TPH+273.16
N=UA(NN)
ARSEC=TPH+1.5
ASA=ASA+ARSEC
TAR(NN)=ARSEC
PV=H*760./(H+0.622)
VESPAR=287.*(ARSEC+273.16)/(133.322*(760.-PV))
VOLUME=AREA*ALTURA
R=610.*VESPAR*VOLUME/(VAZAO*60.*DELTAT*NCAM)
T(1)=ARSEC
RM(1)=H
TA=ARSEC+273.16
A=-7511.52/TA+89.63121+0.02399897*TA
A=A+2.0998405E-11*(TA**4.)-12.150799*ALOG(TA)
A=A-1.1654551E-5*(TA*TA)-1.2810336E-8*(TA*TA*TA)
PS=EXP(A)/0.133322
UREL=(760.*H/(H+0.6219))/PS
UR(NN)=UREL
V00=V00+UREL*100.
IF(UREL.GE.1.)UREL=0.99
XTUEQ=SQRT((-ALOG(1.-UREL))/(0.0000382*(ARSEC*1.8+82.)))
UAI=0.0
GERAIS=0.0
DO 7 I=1,NCAM
IJ=I+1
C=((0.35+0.851*UBU(I))*R)/(1.-UBU(I))
UAF=H
DELLAT=(606.-0.57*T(I))*4.35*EXP(-28.25*UBS(I))
IRW=0
TA=T(I)+273.16
A=-7511.52/TA+89.6312+0.02399897*TA
A=A+2.0998405E-11*(TA**4.)-12.150799*ALOG(TA)
A=A-1.1654551E-5*(TA*TA)-1.2810336E-8*(TA*TA*TA)
PS=EXP(A)/0.133322
URA=(760.*RM(I)/(RM(I)+0.6219))/PS
IF(URA.GE.1.)URA=0.99
URESEC=1.-EXP(-3.82E-5*(1.8*T(I)+82.)*(UBS(I)*100.))**2.)
IF(URA.LT.URESEC)GO TO 28
UREUMI=1.-EXP(-1.045E-4*(1.8*T(I)+82.)*(UBS(I)*100.))**1.72)
IF(URA.GT.UREUMI)GO TO 29
XUI=UBS(I)
UAF=RM(I)
IRW=2
GO TO 10
29 CONTINUE
IRW=1
28 CONTINUE
IF(IRW.EQ.1)GO TO 111
GO TO 112
111 CONTINUE
112 CONTINUE
GC1=TEPGR(I)
TC1=T(I)
UAC1=RM(I)
DMC1=UBS(I)
UAF=RM(I)

```

```

DEHF=0.05
IF (IRW.EQ.1) DEHF=-DEHF
26 XMI=DMC1-(UAF-UAC1)/R
XMI=XMI*100.
TIJ=(C*GC1+0.24*TC1+0.45*UAC1*TC1-((UAF-UAC1)*(587.-GC1+DELLAT)
*)))/(0.24+0.45*UAF+C)
IF (IRW.EQ.1) GO TO 51
ERH=1.-EXP(-3.82E-3*(1.8*TIJ+82.)*XMI**2.)
TA=TIJ+273.16
A=-7511.52/TA+89.63121+0.02399897*TA
A=A+2.0998405E-11*(TA**4.)-12.150799*ALOG(TA)
A=A-1.1654551E-5*(TA*TA)-1.2810336E-8*(TA*TA*TA)
PS=EXP(A)/0.133322
RHSS=(760.*UAF/(UAF+0.6219))/PS
EQZERO=ERH-RHSS
GO TO 42
51 ERH=1.-EXP(-1.045E-4*(1.8*TIJ+82.)*XMI**1.72)
TA=TIJ+273.16
A=-7511.52/TA+89.63121+0.02399897*TA
A=A+2.0998405E-11*(TA**4.)-12.150799*ALOG(TA)
A=A-1.1654551E-5*(TA*TA)-1.2810336E-8*(TA*TA*TA)
PS=EXP(A)/0.133322
RHSS=(760.*UAF/(UAF+0.6219))/PS
EQZERO=RHSS-ERH
42 IF (EQZERO.GT.0.005) GO TO 25
IF (EQZERO.LT.-0.005) GO TO 27
GO TO 24
25 DEHF=0.001
IF (IRW.EQ.1) DEHF=-DEHF
UAF=UAF+DEHF
GO TO 26
27 UAF=UAF-(0.5*DEHF)
DEHF=DEHF*0.5
GO TO 26
24 XUI=UBS(I)-(UAF-RM(I))/R
T(IJ)=(C*TEPGR(I)+0.24*T(I)+0.45*RM(I)*T(I)-((UAF-RM(I))*(587.-
*TEPGR(I)+DELLAT)))/(0.24+0.45*UAF+C)
IF (IRW.EQ.1) GO TO 13
CM1=ABS(UBS(I)-XUI)
IF (CM1.LT.0.000001) GO TO 13
XUC=UBS(I)
XMC=XUC*100.
XUIG=100.*TUIG/(100.-TUIG)
UR1=URA
XUE2=SQRT((-ALOG(1.-UR1))/(0.0000382*(1.8*T(I)+82.)))
XME1=XUE2
IF (XME1.LT.XMC) GO TO 52
WRITE(2,1090) XMC,XUE2,IRW,T(I),UR1
52 IF (XUIG.LT.XMC) GO TO 43
TXUD1=XUIG
GO TO 35
43 TXUD1=XMC
35 DELM=TXUD1-XME1
XMR=(XMC-XME1)/DELM
CN=0.375+8.76*0.01*ALOG(UR1*100.)
CK=0.0821+1.37*0.01*T(I)-1.31*0.0001*T(I)**2.
IF (XMR.LT.0.999) GO TO 101
T2=0.0
GO TO 102
101 T2=(-ALOG(XMR)/CK)**(1./CN)

```

```

102  T2=T2+DELTAT
      XMC=DELM*EXP(-CK*T2+*CN)+XME1
      XUC=XMC/100.
      CM2=ABS(UBS(I)-XUC)
      IF(CM1.LT.CM2)GO TO 13
      XUI=XUC
      UAF=RM(I)+R*(UBS(I)-XUI)
10   CONTINUE
      T(IJ)=(C*TEPGR(I)+0.24*T(I)+0.45*RM(I)*T(I)-((UAF-RM(I))*(587.
*-TEPGR(I)+DELTAT)))/(0.24+0.45*UAF+C)
13   CONTINUE
      UBS(I)=XUI
      UBU(I)=XUI/(1.+XUI)
      UAI=UAI+UBU(I)
      IF(GERAIS.LT.UBU(I))GERAIS=UBU(I)
      TEPGR(I)=T(IJ)
      RM(IJ)=UAF
      DT=DELTAT
      U=UBU(I)
      DM=1.0
      TR=230.
      UBSE=U/(1.-U)*100.
      XMM=0.103*(EXP(455./UBSE**1.53)-0.00845*UBSE+1.558)
      IF(TEPGR(I)-15.6)90,220,220
90   XMT=128.76*EXP(-0.1458*TEPGR(I)-2.592)
      GO TO 70
220  IF(U-0.19)230,230,240
230  U=0.19
240  IF(U-0.28)60,60,50
50   U=0.28
60   XMT=32.3*EXP(-0.1044*TEPGR(I)-1.856)+(U-0.19)*EXP(0.61*(1.8*
*-TEPGR(I)-28.)/60.)
70   STEELE=TR*XMM*XMT*DM
      TEMDET(I)=TEMDET(I)+(DT*230.)/STEELE
      DETERI(I)=0.0884*(EXP(0.006*TEMDET(I))-1.)+0.00102*TEMDET(I)
7    CONTINUE
      TEMPO=TEMPO+DELTAT
      WRITE(3,3040)TEMPO
3040 FORMAT(35X, ' TEMPO =',F6.2)
      TPRINT=TPRINT+DELTAT
      UAI=UAI/NCAM
      IF(TPRINT.LT.DELPRT)GO TO 58
      TPRINT=TPRINT-DELPRT
      WRITE(2,4000)IH,MM
      WRITE(2,1120)TEMPO
      WRITE(2,1139)TAR(NN),UR(NN)
      WRITE(2,1140)(JX,MAJOR(JX),JX=1,NCAM)
      WRITE(2,1142)(JX,TEPGR(JX),JX=1,NCAM)
      WRITE(2,1144)(JX,UBU(JX),JX=1,NCAM)
      WRITE(2,1146)(JX,DETERI(JX),JX=1,NCAM)
      WRITE(2,1258)UAI
1258 FORMAT(1X,'UAI =',F7.4)
58   IF(UAI.LT.0.13.AND.GERAIS.LT.0.145)GO TO 370
      GO TO 15
117  UMIMED=0.0
      UMIMAX=0.0
      DO 14 I=1,NCAM
      UMIMED=UMIMED+UBU(I)/FLOAT(NCAM)
      IF(UBU(I).GT.UMIMAX)UMIMAX=UBU(I)
14   CONTINUE

```



```

UMIMED=UMIMED*100.
UMIMAX=UMIMAX*100.
WRITE(3,2005)UMIMED
2005 FORMAT(1X,' UMIMED =',F7.2)
TAR(JL)=ASA/NN
UR(JL)=VOO/NN
TARN=TAR(JL)
URN=UR(JL)
GO TO 2000
370 UMIMED=UAI*100.
URN=UR(NN)
TARN=TAR(NN)
UMIMAX=GERAIS*100.
2000 MIG=0
DET=0.0
DO 11 M=1,NCAM
IF(DET.LT.DETERI(M))DET=DETERI(M)
11 CONTINUE
19 WRITE(2,1120)TEMPO
WRITE(2,1130)TARN,URN
WRITE(2,1140)(JM,MAJOR(JM),JM=1,NCAM)
WRITE(2,1142)(JM,TEPER(JM),JM=1,NCAM)
WRITE(2,1144)(JM,UBU(JM),JM=1,NCAM)
WRITE(2,1146)(JM,DETERI(JM),JM=1,NCAM)
WRITE(2,1150)UMIMED,UMIMAX
IF(MIG.EQ.7215)GO TO 21
9 IF((UMIMED.GT.TMUFO.OR.UMIMAX.GT.TUMAX).AND.DET.LT.0.5)GO TO 5
WRITE(2,1155)IH,MM
MIG=7215
GO TO 19
5 CONTINUE
21 WRITE(2,1160)TEMPO,DET
80 FORMAT(' INSERIR O VALOR DE .... TAM = ')
85 FORMAT(F6.2)
175 FORMAT(4A4)
200 FORMAT(5(' UA('I3')='F6.3,5X))
210 FORMAT(/,' LEITURA DE DADOS "TEMPERATURAS DE SAIDA" ,
* DADOS LIDOS NO ARQUIVO: "'4A4,/)
215 FORMAT(5(' TS('I3')='F5.1,5X))
360 FORMAT(' QUAL O NOME DO 1o. ARQUIVO DE DADOS ?',/)
380 FORMAT(' QUAL O NOME DO 2o. ARQUIVO DE DADOS ?',/)
390 FORMAT(/,' LEITURA DE DADOS "UMIDADE ABSOLUTA" ; DADOS
* LIDOS NO ARQUIVO: "'4A4,/)
800 FORMAT(' INSERIR HORA PARA INICIAR ..... IH = ')
810 FORMAT(' INSERIR HORA DE INICIO DO DIA SEGUINTE ..... JH = ')
820 FORMAT(' INSERIR HORA DO POR DO SOL ..... IS = ')
850 FORMAT(I2)
880 FORMAT(' INSERIR MINUTOS INICIAIS ..... MM = ')
890 FORMAT(' INSERIR MINUTOS INICIAIS DO DIA SEGUINTE ..... LL = ')
1000 FORMAT(1X,'TEMPO1 =',F6.2,10X,'TMAX =',F6.2,10X,'MIN =',I10)
1002 FORMAT(1X,'INSERIR O VALOR DE ..... LQ = ')
1005 FORMAT(1X,'TUIG =',F10.5,5X,'VAZAO =',F10.5,5X,'AREA =',F10.5)
1010 FORMAT(///,'SE DESEJA LISTAR TYPE ( 1 ) <ENTER.'
*/,'SE N A O TYPE ( 0 ) <ENTER.'/)
1011 FORMAT(1X,'ALTURA =',F10.5,5X,'TMUFO =',F10.5,5X,'TUMAX =',F10.
*5,5X,'DELTAT =',F10.5)
1015 FORMAT(I1)
1016 FORMAT(1X,'NDT =',I10,5X,'DELPRT =',F10.5,5X,'NCAM =',I10)
1020 FORMAT(1X,'TPH =',F10.2,5X,'URM =',F10.2)
1025 FORMAT(1X,'VAZAO =',F6.3,' M3/MIN/TON')

```

```

1050  FORMAT(1X,'POSSIVEL ERRO NAS VARIAVEIS',/,1), 'XMC =',F8.4,5X,'X
*UE2 =',F8.4,5X,'IRW =',F5.2,5X,'T(I) =',F8.4,5X,'UR1 =',F8.4)
1100  FORMAT(1X,'O METODO NAO CONVERGIU EM',I2,' ITERACOES')
1110  FORMAT(1X,'T2 =',F10.4,5X,'T1 =',F10.4,5X,'Z1 =',F10.4,5X,'Z2 =
*',F10.4)
1115  FORMAT(1X,'X =',F10.4,5X,'Y =',F10.4,5X,'U =',F10.4,5X,'XMR =',
*F10.4)
1120  FORMAT(1X,'TEMPO TRANSCORRIDO =',F9.1,' HORAS',/)
1130  FORMAT(1X,'TEMP. MEDIA =',F8.2,/,2X,'UR. MEDIA =',F8.2,/)
1135  FORMAT(1X,'TEMP =',F5.2,/,1X,'UR =',F5.2)
1135  FORMAT(1X,'UMIMED =',F5.2)
1140  FORMAT(1X,5('MAJOR('I2') =',I2,5X))
1142  FORMAT(1X,5('TEPGR('I2') =',F8.4,5X))
1144  FORMAT(1X,5('UBU('I2') =',F8.4,5X))
1146  FORMAT(1X,5('DETERI('I2') =',F8.4,5X))
1150  FORMAT(1X,'UMIMED =',F6.2,10X,'UMIMAX =',F6.2)
1155  FORMAT(/,5X,'HORAS FINAIS DE SECAGEM DO DIA 'I2' : 'I2'  HORA
*(5) -')
1160  FORMAT(1X,'A SECAGEM TERMINOU APOS',F6.2,' HORAS',/,1X,'A DETE
*RIORACAO MAXIMA FOI DE ',F8.4)
4000  FORMAT(/,1X,' DECCORRIDAS 'I2' : 'I2' HORAS) -')
4001  FORMAT(5X,'TEMPO =',F5.2,5X,'TTEMPO =',F5.2)
5000  STOP
      END

```

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] AIKAWA, S.; MATA, S.F.; ROMANI, S.C. A importância dos coletores na viabilização da secagem de grãos com energia solar; Seminários sobre secagem de produtos agrícolas com energia solar, Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, Campinas, SP, 1983.
- [2] AIKAWA, S.; ROMANI, S.C.; MATA, S.F. Estudo comparativo de secagem de milho com ar natural e aquecedores artificiais; Seminário: Secagem e Eletrotermia, São Paulo, SP, 1984.
- [3] AIKAWA, S.; ROMANI, S.C.; MATA, S.F. Estudo de um sistema total com simulação matemática de coletor solar e secagem de grãos, em regime permanente e transitório; IV Congresso Latino Americano de Energia Solar, Caracas, Venezuela, 1983.
- [4] BRINSFIELD, R.B.; FELTON, K.E. Performance of a solar air collector under varying conditions; St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1979. (Paper nº 79-4549).
- [5] BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Drying cereal grain Westpoint, AVI Publusing, 1974.
- [6] CAHIROL, T.; PELISSON, A.; ROUX, D. Le chauffe eau solaire; Colletion technologies douces, Aix-en-Provence, 1976.
- [7] CALDERWOOD, D.L. Rice drying with solar heat; St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1979.

- [8] DORFMAN, E. Pré-secagem de café em barcaça com utilização de energia solar. Campinas, 1980. 95 p. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola - UNICAMP.
- [9] DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. Solar energy thermal processes. New York, Wiley, 1974.
- [10] GAYANILO, V.G.; BERN, C.J.; KLEINE, G.L. A solar heated grain dryer for the tropics. St Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1979. (Paper nº 79-3528).
- [11] HIAT, R.S.; PARKER, B.F. Simulations testing of three flat plate solar collector designs. St Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1979. (Paper nº 79-4548).
- [12] KAYS, W.M. Convective heat and mass transfer, New York, McGraw-Hill, 1966.
- [13] KLEIN, S.A.; DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. Transient considerations of flat plate solar collectors. ASME, J. Engr. Power, 96A, 109, 1974.
- [14] KREITH, F. Princípios da transmissão de calor. São Paulo, Edgar Blücher, 1969.
- [15] McADAMS, W.C. Heat transmission. 3ª ed. New York, McGraw-Hill 1954.
- [16] MOREY, R.V.; CLOUD, H.A.; NELSON, W.W. Simulation of solar energy grain drying; Minnesota Contribution. St. Paul, Agricultural Engineering Department, University of Minnesota, 1976.

- [17] OSPINA MACHADO, J.H. Quantificação da deterioração de mandioca durante a secagem em barcaça por convecção forçada de ar a quecido com coletor solar. Campinas, 1980. 98 p. Tese(Mestrado - Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola - UNICAMP.
- [18] QUEIROZ, D.M.; MELO, F.C.; PEREIRA, J.A.M. Curso de simulação de secagem: modelos de Hukill, Morey e Thompson para secagem a altas e baixas temperaturas. Centro Nacional de Treinamento em Armazenamento, Universidade Federal de Viçosa, 1983.
- [19] QUEIROZ, D.M.; MELO, E.C.; PEREIRA, J.A.M. Práticas de simulação de secagem em calculadoras programáveis. Viçosa, CENTREINAR, 1982.
- [20] ROSSI, S.J.; ROA, G.H. Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural. São Paulo, Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1980. 295 p. (Publ. ACIESP, 22).
- [21] SANTOS, L.A. Construção e avaliação de um coletor armazenador de energia solar, não convencional, para aquecimento de ar na secagem de produtos agrícolas. Campinas, 1980. 135 p. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola - UNICAMP.
- [22] SILVA, R.B. Manual de termodinâmica e transmissão de calor. 4ª ed. São Paulo, Grêmio Politécnico, 1972. 7 seq. pg. irrig.

- [23] THOMPSON, T.L. Temporary storage of high moisture shelled corn using continuous aeration. Transactions of the ASAE, St. Joseph. 15(2):333-337. 1972.
- [24] THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. Mathematical Simulation of corn drying a new model. Transactions of the ASAE, St. Joseph. 11(4):582-586. 1968.
- [25] WILHELM, L.R. Numerical calculation of psychrometric properties in SI units. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 19(2): 318-325. 1976.